

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інженерно-фізичний факультет

Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

«На правах
рукопису» УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В. І. Мазур

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

за освітньо-професійною програмою

Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів

зі спеціальності

132 Матеріалознавство

на тему: «**Структура та властивості сплавів систем Nb-Si-B,**

Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo для високотемпературних застосувань»

Виконав: магістрант II курсу , групи ФН-81мп

Левіцький Анатолій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент к.т.н. Троснікова І. Ю.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з розділу охорони праці:

доцент, к.т.н. Арламов О. Ю.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з економічного розділу:

доцент, к.е.н. Петренко К. В.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль доцент, к.т.н. Бірюкович Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент, к.т.н. Дудка О. І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Магістрант _____

(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

| | |
|------------------------------|---|
| Факультет | Інженерно-фізичний |
| Кафедра | Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії |
| Рівень вищої освіти | другий (магістерський) |
| Спеціальність | 132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО |
| Освітньо-професійна програма | Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів |
| Вибірковий блок | Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів |

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

В.о. завідувача кафедри

Мазур В. І.

“ _____ ” _____ 2019 р.

З А В Д А Н Н Я

на магістерську дисертацію магістранту
Левіцькому Анатолію Миколайовичу

1. Тема дисертації: Структура та властивості сплавів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo для високотемпературних застосувань
Науковий керівник дисертації: доцент, к.т.н., Троснікова Ірина Юріївна, затверджений наказом по університету від «12» листопада 2019 р. № 3890-с
2. Строк подання дисертації: 17.12.2019 р.
3. Вихідні дані до дисертації: стан проблеми одержання сплавів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo, діаграми стану, властивості фазових складових, область застосування цих сплавів
4. Зміст роботи: Основна частина: літературний огляд щодо структури, методів отримання та властивостей композиційних матеріалів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo; експериментальна частина, обговорення результатів, економічний розділ, розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, розроблення старап-проекту, висновки, перелік використаної літератури

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) сучасний стан розвитку високотемпературних матеріалів, мікроструктура сплавів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo, хімічний склад сплавів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo, механічні властивості, висновки

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | доцент, к.т.н. Арламов О. Ю. | | |
| Економічний розділ | доцент, к.е.н. Петренко К. В. | | |

7. Дата видачі завдання 01.10.2019 р.

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|--------------------------------|----------|
| 1 | Літературний та патентний пошук | 02.09.19-15.09.19 | |
| 2 | Одержання сплавів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo | 09.09.19-06.10.19 | |
| 3 | Дослідження мікроструктури | 07.10.19-13.10.19 | |
| 4 | Вивчення мікромеханічних властивостей | 14.10.19-01.11.19 | |
| 5 | Оформлення економічного розділу | 04.11.19-15.11.19 | |
| 6 | Оформлення розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях | 18.11.19-29.11.19 | |
| 7 | Розробка стартап проекту | 11.11.19-22.11.19 | |
| 8 | Підготовка презентації | 02.12.19-06.12.19 | |

Студент _____ Левіцький А. М.

Керівник роботи _____ Троснікова І. Ю.

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 85 с., 28 рис., 14 табл., 39 джерел.

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ОПЛАВЛЕННЯ, МІКРОСТРУКТУРА,
МІКРОТВЕРДІСТЬ, ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ.

Об'єкт дослідження: сплави систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) ат. %: Nb-25Si-13B, Nb-Si-25Cr, Nb-6Si-30Cr, Nb-6Si-35Cr, Nb-20Si-2Mo, Nb-20Si-4Mo, Nb-20Si-6Mo, Nb-20Si-22Ti, Nb-20Si-24Ti, одержані електронно-променевим спіканням.

Метою роботи є вивчення структури та властивостей евтектичних сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti), одержаних електронно-променевим оплавленням.

Методи дослідження та апаратура: отримання сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) здійснювалось в установці ЭЛА-6. За допомогою комплексу високоінформативних методів фізичного матеріалознавства (електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектрального аналізу) досліджено мікро- та макроструктуру, хімічний склад фазових складових сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti). Також виміряна мікротвердість та тріщиностійкість на мікротвердомірі ПМТ-3.

ABSTRACT

The work contains: 85 p., 28 fig., 14 tabl., 39 refer.

ELECTRON BEAM SINTERING, MICROSTRUCTURE, MICROHARDNESS, CRACK RESISTANCE.

The object of study: the alloys of the system Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) at. %: Nb-25Si-13B, Nb-Si-25Cr, Nb-6Si-30Cr, Nb-6Si-35Cr, Nb-20Si-2Mo, Nb-20Si-4Mo, Nb-20Si-6Mo, Nb-20Si-22Ti, Nb-20Si-24Ti obtained by electron beam sintering.

The purpose of the work is to study the structure and properties of alloys of the Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) system obtained by electron beam sintering.

Research methods and equipment: the alloys of system Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) were obtained by ELA-6.

The micro- and macrostructure, the chemical composition of the phase components of the resulting Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) alloys, was studied using a set of highly informative methods of physical material science (electron microscopy, chemical analysis). It was measured is microhardness and crack resistance.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 8 |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД | 9 |
| 1.1 Класифікація матеріалів для виготовлення газотурбінних двигунів | 9 |
| 1.1.1 Сплави на основі нікелю | 10 |
| 1.1.2 Сплави Nb-Si-Cr..... | 11 |
| 1.1.3 Сплави Nb-Si-Mo | 11 |
| 1.1.4 Сплави Nb-Si-Ti | 12 |
| 1.2 Діаграми стану | 12 |
| 1.2.1 Система Nb-Si-B | 12 |
| 1.2.2 Система Nb-Si-Cr | 13 |
| 1.2.3 Система Nb-Si-Mo..... | 14 |
| 1.2.4 Система Nb-Si-Ti..... | 15 |
| 1.2.5 Властивості фаз..... | 16 |
| 1.3 Технології виготовлення сплавів | 18 |
| 1.3.1 Сплави системи Nb-Si-Cr | 18 |
| 1.3.2 Сплави системи Nb-Si-Mo..... | 19 |
| 1.3.3 Сплави системи Nb-Si-Ti..... | 20 |
| 1.3.4 Сплави системи Nb-Si-B..... | 20 |
| 1.4 Властивості матеріалів для газотурбінобудування | 23 |
| 1.5 Висновки та постановка задач дослідження..... | 24 |
| 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ | 25 |
| 2.1 Вихідні матеріали | 25 |
| 2.2 Пресування циліндрів | 29 |
| 2.3 Сушка циліндрів | 29 |
| 2.4 Електронно-променеве оплавлення | 29 |
| 2.5 Дослідження мікроструктури та хімічного складу | 30 |
| 2.6 Вивчення мікромеханічних властивостей | 31 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4 | ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 46 |
| 4.1 | Безпека технологічних процесів | 46 |
| 4.2 | Вимоги до виробничих приміщень | 49 |
| 4.3 | Безпека технологічного обладнання | 53 |
| 5 | ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ | 54 |
| 6 | ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ | 58 |
| 6.1 | Розрахунок чисельності виробничих робітників та їх заробітної плати..... | 58 |
| 6.2 | Визначення фондів заробітної плати | 60 |
| 7 | ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ | 63 |
| 7.1 | Науково-технічна актуальність ДР | 63 |
| 7.2 | Розрахунок витрат на проведення НДР | 63 |
| 7.2.1 | Витрати на оплату праці..... | 64 |
| 7.2.2 | Єдиний соціальний внесок | 65 |
| 7.2.3 | Матеріали, необхідні для проведення досліджень..... | 66 |
| 7.2.4 | Витрати на спеціальне обладнання та прилади..... | 66 |
| 7.2.5 | Витрати на службові відрядження | 67 |
| 7.2.6 | Інші прямі не враховані витрати | 67 |
| 7.2.7 | Накладні витрати | 67 |
| 7.2.8 | Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми | 68 |
| 7.3 | Науково-технічна ефективність НДР..... | 68 |
| 8 | РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ..... | 70 |
| | ВИСНОВКИ | 79 |
| | CONCLUSIONS..... | 80 |
| | ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ | 81 |

ВСТУП

У промисловому застосуванні літальних двигунів суперсплави на основі нікелю вже працюють з найвищою температурною потужністю, і потенціал для підвищення його робочої температури майже неможливий. Таким чином, для проходження цієї межі необхідно знайти перспективні матеріали з більш високими температурами плавлення. Сплави на основі Nb розглядаються як найбільш перспективні матеріали для майбутнього застосування для турбін, завдяки його щільності та достатній високотемпературній міцності. Однак низька окислювальна стійкість сплавів на основі Nb за високих температур є головним бар'єром на шляху застосування техніки [1].

Сплави на основі Nb-Si з двофазною мікроструктурою Nb/Nb₅Si₃ мають значний інтерес, оскільки вони володіють високою температурою плавлення 2520 °C, високою стійкістю, відносно низькою щільністю (7,1 г/см³) та чудовими механічними властивостями за підвищених температур. Для високотемпературних конструкційних матеріалів найважливіші вимоги до застосування є врівноважені властивості, в тому числі міцність за кімнатної температури, високотемпературна міцність та окислювальна здатність [2].

Також сплав на основі Nb-Ti-Si є одним із перспективних кандидатів для високотемпературних компонентів реактивних двигунів через їх високу температуру плавлення та низьку щільність [3].

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Класифікація матеріалів для виготовлення газотурбінних двигунів

Суперсплави або жароміцні сплави – сплави на залізохромонікелевій, нікелевій, кобальтовій або змішаній основі, що відзначаються високим опором пластичній деформації та руйнуванню в умовах високих температур та окиснювальних середовищ. Жароміцні сплави застосовують для виготовлення парових і газових турбін, авіаційних, суднових і залізничних газотурбінних двигунів, деталей двигунів внутрішнього згоряння в енергетичному машинобудуванні, тощо [4].

Жароміцні сплави за умовами роботи можна розподілити на 3 групи:

- сплави, які піддаються значним і короткочасним (від секунд до годин) механічним навантаженням за умов високих температур;
- сплави, які знаходяться під навантаженням за високих температур протягом десятків та сотень годин;
- сплави, які призначені для роботи в умовах високих навантажень і високих температур протягом тисяч, десятків, а інколи й сотень тисяч годин.

Залежно від цього помітно змінюються вимоги до структури сплаву. Також жароміцні сплави класифікують за їх основою: залізні, нікелеві, берилієві, титанові тощо. Назва за основою дає уявлення про інтервал робочих температур, який залежно від тривалості та прикладених навантажень і їх дії складає 0,4...0,8 від температури плавлення основи. Залежно від призначення жароміцні сплави виготовляють з малою чутливістю до надрізів, з підвищеним опором втомі і ерозії, термостійкі, для експлуатації за значних і короткочасних навантажень та ін. Наприклад, жароміцні сплави які використовуються у космічній техніці, повинні мати низьку випаровуваність [4].

1.1.1 Сплави на основі нікелю

Здатність нікелю розчиняти в собі велику кількість інших металів під час цього зберігаючи пластичність призвела до створення великого числа нікелевих сплавів.

Корисні властивості нікелевих сплавів певною мірою зумовлені властивостями самого нікелю, серед яких поряд із здатністю утворювати тверді розчини з багатьма металами виділяються висока корозійна стійкість в газових і рідких середовищах, феромагнетизм, відсутність алотропічних перетворень [5].

Найбільш надійними та освоєними в вітчизняній та зарубіжній практиці виготовлення лопаток турбін є жароміцні сплави на нікелевій основі з інтерметалідним зміцненням. Це складні, багатофазні сплави типу ЕП, ЕИ, ТАЗ, MAR, TRW, ЧС, ЖС, ВЖЛ, IN, CMSX та ін., в яких об'ємна доля часток основної зміцнюючої γ' -фази, когерентно зв'язаної з матрицею, досягає 50-60%.

Сучасні найбільш жароміцні високолеговані ливарні сплави ЖС6У, ЖС32, ЖС36, ЖС16, ЖС30, ЖС26, ЖС40 відрізняються неоднорідністю форми та дисперсності часток γ' -фази як в литому, так і в термообробленому стані [6].

Під час 2-ої світової війни у Великій Британії розпочалось виробництво жароміцних сплавів Ni-Cr-Ti-Al так званих німоніків. Ці сплави, що були створені в результаті легування ніхрому (типу Х20Н80) титаном (2,5%) і алюмінієм (1,2%) (Вільям Гріффітс), мали помітну перевагу по жароміцності над ніхромами або спеціальними легованими сталями. Поява цих сплавів стала поштовхом для розвитку авіаційних газотурбінних двигунів.

Ускладнення процесу легування погіршує здатність сплавів до гарячої обробки тиском [7].

1.1.2 Сплави Nb-Si-Cr

Для двофазних сплавів Nb/Nb₅Si₃ міцність при кімнатній температурі, високотемпературна міцність і стійкість до повзання можуть забезпечуватися пластичною фазою Nb і жорсткістю силіциду Nb₅Si₃ відповідно; однак жодна фаза не може протистояти окисленню, що може спричинити катастрофічні наслідки, коли сплави Nb/Nb₅Si₃ знаходяться в експлуатації в атмосфері кисню при високих температурах. Додавання Cr до сплавів на основі Nb-Si утворює окислення проти фази Laves Cr₂Nb і зменшує розподіл кисню та розчинність у Nb, що підвищує екологічну стабільність сплавів на основі Nb-Si при високих температурах. Короткострокова мета, що відповідає втраті товщини матеріалу 200 мкм при 10-годинному впливі повітря при 1370 °C, успішно досягнута для потрібних сплавів на основі Nb-Si-Cr з трифазною мікроструктурою Nb/Nb₅Si₃/Cr₂Nb. Тому фази ніобію, Nb₅Si₃ і Cr₂Nb є основними фазами для розробленого сплаву на основі Nb-Si. Згодом оптимізація мікроструктури та визначення властивостей, залежних від фракцій Nb, Nb₅Si₃ та Cr₂Nb, стають нагальними питаннями при розробці сплавів на основі Nb-Si [1].

1.1.3 Сплави Nb-Si-Mo

Для розробки високотемпературного сплаву нового покоління для заміни супер-сплавів на основі Ni, були розроблені сплави на основі Nb-силіцидів. Сплав Nb також називають композитом Nb-силіциду, оскільки він складається з фази твердого розчину металу та фази силіциду, утвореної приєднанням Si. Оскільки фаза силіциду має високу міцність і стійкість до повзучості при високих температурах, сплав Nb має набагато більш високі механічні властивості, ніж суперсплави на основі Ni при надзвичайно високих температурах. Також він демонструє хорошу високотемпературну стійкість до окислення шляхом утворення на поверхні захисного шару SiO₂ [8].

1.1.4 Сплави Nb-Si-Ti

Чимало зусиль у галузі методів легування та обробки було докладено для того, щоб система покращила продуктивність сервісу за допомогою регулювання складових фаз і осадів. Еволюційні характеристики $\gamma\text{Nb}_5\text{Si}_3$ в даний час є життєво важливими для розробки сучасних сплавів на основі Nb-Ti-Si [9].

1.2 Діаграми стану

1.2.1 Система Nb-Si-B

Для вивчення процесу сплавоутворення в системі Nb-Si-B розглядається ізотермічний розріз системи Nb-Si-B за температури 1600 °C котра представлена на рисунку 1.1.

Дві теоретичні фази утворюються з великими областями однорідності, $\text{Nb}_5\text{Si}_3\text{B}$ і $\text{Nb}_5(\text{Si}, \text{B})_3$, називаються D8 і T2, відповідно. У фазі T2 є тетрагональна структура кристалу типу Cr_5V_3 , в якій кремній заміщається бором, тоді як фаза D₈₈ має структуру шестикутного кристалу Mn_5Si_3 , в якій бор знаходиться в проміжному місці. Існує велика область рівноваги між металом ніобію та фазою T2. Не було проведено досліджень з приводу поведінки окиснення потрійної фази T2 в системі Nb-Si-B [10].

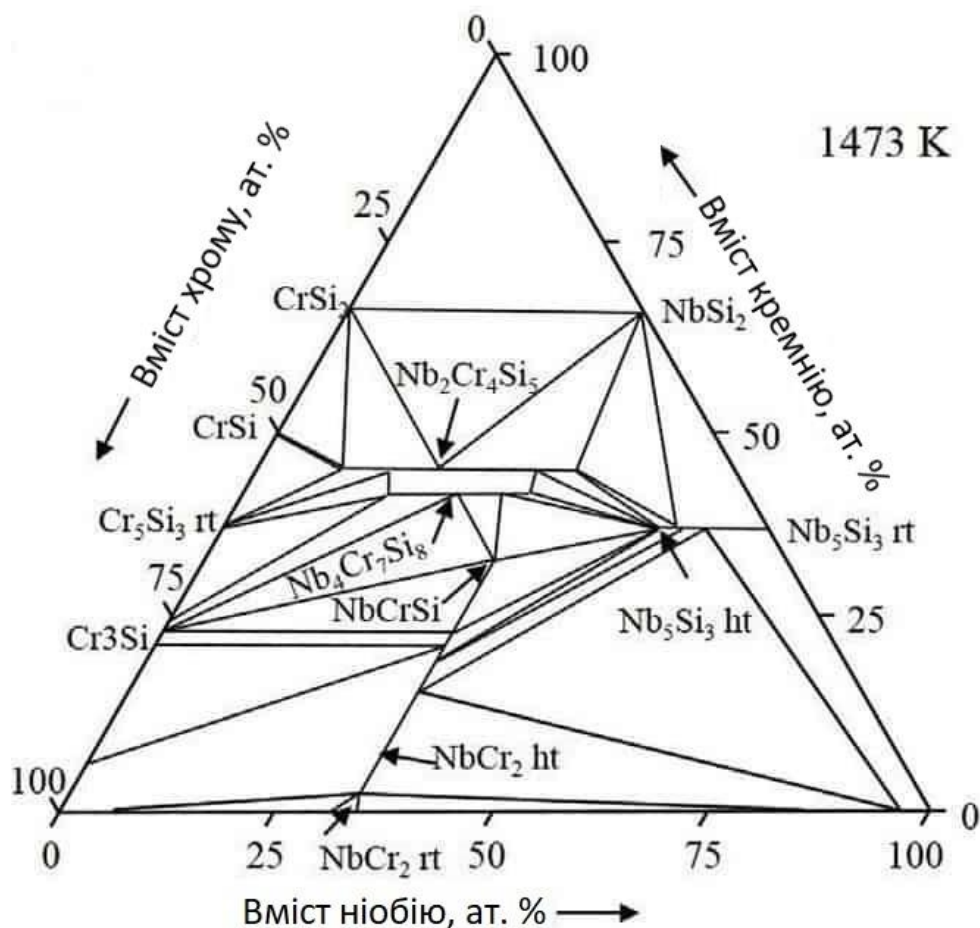


Рисунок 1.2 – Діаграма стану потрійних сплавів на основі Nb-Si-Cr [2]

1.2.3 Система Nb-Si-Mo

Коли Nb-Si сплави містять більше 18,7 ат% Si, Nb_5Si_3 є первинною фазою, яка в першу чергу осаджується з розплаву. Фаза Nb_5Si_3 кристалізується з наступних трьох кристалічних структур: $\alpha\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ (I4/mcm), $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ (I4/mcm) та $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ (P63/mcm). Фаза $\alpha\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ і $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ зазвичай утворюються в сплавах на основі Nb-Si, тоді як фаза $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ присутня лише в деяких спеціальних сплавах на основі Nb-Si, таких як, що утворюються при додаванні Hf або Ti. Первинна фаза перетворюється з Nbss в Nb_5Si_3 з додаванням деяких легуючих елементів. Розміри зерен первинної фази Nb_5Si_3 великі, а форми - це переважно смуги та блоки. В'язкість кімнатної температури фази Nb_5Si_3 з великими розмірами і гострі

фасетні краї є поганими у сплавах на основі Nb-Si, що сильно впливає на механічні властивості сплавів на основі Nb-Si [11].

Додавання Мо сприяє формуванню унікальної мікроструктури, яка містить лише фазу Nbss та фазу β -Nb₅Si₃ у сплавах на основі Nb-Si (рис. 1.3). Крім того, елементарний Мо може посилити фазу Nbss [11].

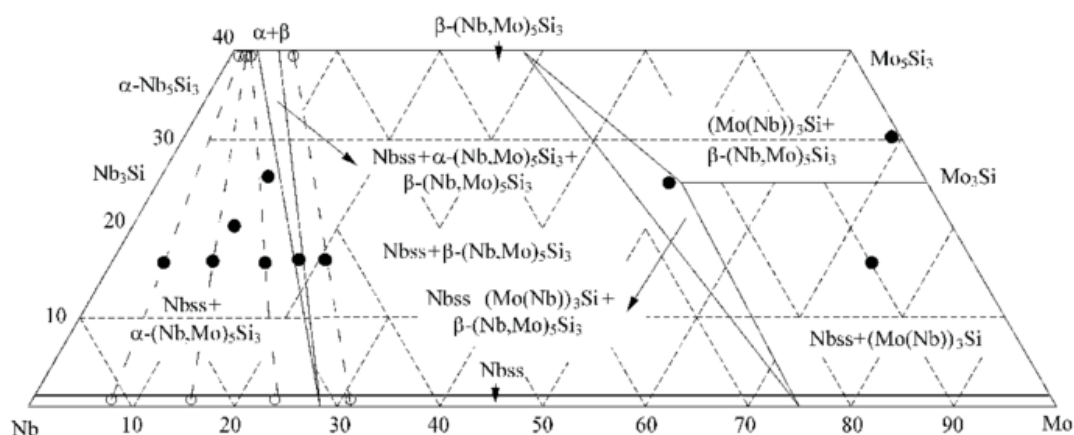


Рисунок 1.3 – Потрійна діаграма стану сплаву Nb-Mo-Si при 1200 °C [11]

1.2.4 Система Nb-Si-Ti

Багатокомпонентний сплав на основі Nb-Ti-Si (рис. 1.4) складається в основному з Nbss та Nb₅Si₃, а також деяких інших осадів. Осади силіцидів, такі як Nb₃Si та Nb₅Si₃, утворюються всередині Nbss, що може підвищити високотемпературну міцність, а також стійкість до повзучості сплаву. Еволюційні характеристики γ Nb₅Si₃ в даний час є життєво важливими для розробки сучасних сплавів на основі Nb-Ti-Si [3].

Існують відносні орієнтації (OR) $[111]_{Nb} // [0001]_{\gamma}$ і $(101)_{Nb} == (1100)_{\gamma}$ і поблизу когерентних інтерфейсів утворюються між γ Nb₅Si₃ і Nbss осадами. Однак температура та процес утворення γ Nb₅Si₃ досі не зрозумілі. Дислокації, анізотропний ріст та гранні/атомні кроки завжди відіграють важливу роль у

формуванні нанокристалів. Крім того, зміна морфологій, орієнтації, а також дисперсії осадів мають великий вплив на механічні властивості сплавів [3].

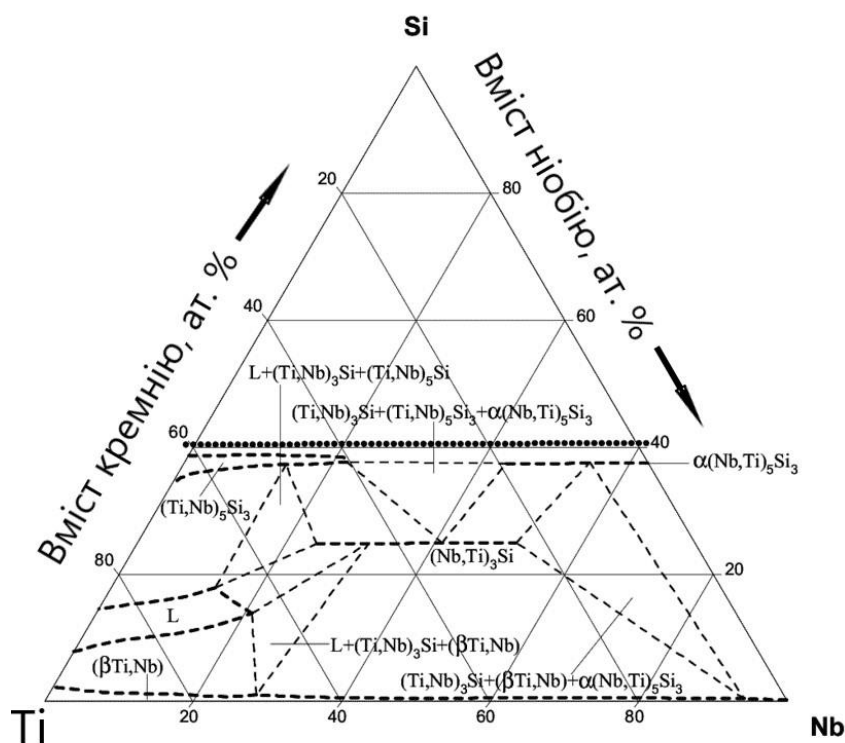


Рисунок 1.4 – Потрійна діаграма стану сплаву Nb-Ti-Si при 1500 °C [3]

1.2.5 Властивості фаз

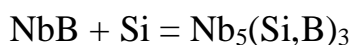
Відомо [12], що в системі Nb-Si-B існують потрійні сполуки: $\text{Nb}_5\text{Si}_3\text{B}_y$ (структура типу Mn_5Si_3 , гексагональна модифікація) та $\text{Nb}_5(\text{Si},\text{B})_3$ (структурний тип Cr_5B_3 , тетрагональна модифікація), що називається фази D_{88} та T_2 відповідно. Фаза T_2 утворюється завдяки заміні бором кремнію в інтерметалічній суміші Nb_5Si_3 , тоді як у фазі D_{88} бор знаходиться в проміжках. Параметри елементної ґратки фази T_2 лінійно знижуються зі збільшенням вмісту бору в його складі [12]. Широкий діапазон розчинності бору в Nb_5Si_3 зумовлений дефектною структурою фази T_2 . Згідно з термодинамічними розрахунками, максимальна розчинність бору в фазі T_2 досягає значення 23,5% за температури 1873 K [13].

У [14] вивчалися фазові рівноваги на діаграмі стану Nb-Si-B з високим вмістом ніобію (66,5-90 мас. %), послідовність кристалізації фаз та області стабільного виникнення твердих розчинів фаз T_2 та Nb_{ss} .

У відповідності з діаграмою стану Nb-Nb₅Si₃-NbB [15] за температури 2073 К існує широкий діапазон виникнення твердого розчину α -Nb₅Si₃-Nb₅SiB₂ (фаза T_2), а фаза T_2 знаходиться в рівновазі з твердим розчином Nb_{ss} , NbB, Nb₃Si і фазою T_1 (β -Nb₅Si₃).

На мікроструктурі виявлені кристалічні сплави, що містять до 60 мас. % ніобію, NbB, Nb₃Si, фази T_2 , фази T_1 (β -Nb₅Si₃) та D₈₈ [16].

Згідно з [17] взаємодії в системі NbSi₂-B супроводжуються утворенням бориду ніобію NbB₂, вивільненням бору з його ґратки та подальшої взаємодії з силіцидом ніобію Nb₅Si₃:



Можливість заміни кремнію бором в силіциді NbSi₂ з утворенням бориду NbB₂ була обговорена в [18]. Автори припустили, що механізм окиснення в сплавах NbSi₂ та NbB₂ включає в себе утворення оксидів Nb₂O₅, NbO₂, SiO₂ та B₂O₃, в результаті взаємодії між ними утворюються подвійні оксиди Nb₃BO₉ і (B, Si)O₂.

Формування боросилікатного шару спричиняє збільшення окислювального опору сплавів [19]. Для інтерметалідів NbSi₂ спостерігалось прискорене окислення внаслідок зростання пористого оксиду та трансформації до аморфного кристала SiO₂ [19].

Згідно [12] стійкість до окиснення потрійної фази в системі Nb-Si-B – Nb₅Si₃B₂ вище в порівнянні з інтерметалідом Nb₅Si₃, але утворення боросилікатного шару не було зареєстровано.

Стабільність окиснення фазових компонентів сплавів $\text{Nb}_5\text{Si}_3(\text{D}_{88})\text{-NbB}_2\text{-NbSi}_2$ збільшується в наступних серіях: NbB_2 , Nb_5Si_3 , D_{88} та NbSi_2 [19].

Відповідно до [21] фаза D_{88} має нищий опір окисленню, ніж T_2 .

Вивчення процесу окиснення NbB_2 , що виникає за температур вище 1000°C під час утворення B_2O_3 та Nb_3BO_9 , показало низьку корозійну стійкість сплаву [22].

Отже, механізм впливу бору на окиснення сплавів в системі Nb-Si-B потребує подальшого вивчення. Особливий інтерес є в вивченні процесу окиснення сплавів Nb-Si з додаванням бору [23].

Стійкість до окиснення фази $\text{Nb}_5\text{Si}_3\text{B}_2$ вища в порівнянні з силіцидом ніобію Nb_5Si_3 , але утворення боросилікатного шару не було зареєстровано [24].

1.3 Технології виготовлення сплавів

1.3.1 Сплави системи Nb-Si-Cr

Виливки сплавів системи Nb-Si-Cr виготовляли за допомогою (VCAM) в атмосфері аргону. Використовувані елементи були високої чистоти: ніобій (99,95 ваг. %), хром (99,95 мас.%) та кремні (99,99 мас.%). Виливки повторно плавили п'ять разів, щоб забезпечити хімічну однорідність, і зразки розмірами приблизно $8 \times 8 \times 3$ мм вирізали з центру злитків за допомогою електроприладом. Отримані зразки подрібнювали, щоб видалити поверхневі забруднення в процесі обробки, а потім ультразвуком, очищали ацетоном перед тестом на окислення [9].

На сьогоднішній день успішно виготовлені сплави на основі Nb-Si методом плавлення вакуумною дугою та спрямованою кристалізацією.

Однак сплави Nb-Si, виготовлені вищезгаданими методами лиття, зазвичай, мають елементову сегрегацію та грубу мікроструктуру. Сплави, виготовлені за технологією порошкової металургії, сплави на основі Nb-Si можуть отримати однорідну та контрольовану мікроструктуру (у морфології, частці та розмірі

складової фази) за допомогою коригування металургійних параметрів порошку, таких як час фрезерування та температура спікання, що зручно для розуміння кількісної залежності між фазовими параметрами (фракція та властивість) та поведінкою сплавів. У кількох звітах було показано вплив металургійних параметрів порошку, таких як час фрезерування та температура спікання на мікроструктурну еволюцію та механічні властивості бінарних сплавів Nb-Si, потрійних Nb-Si-Ti (Fe) та багатокомпонентних сплавах Nb-Si-Ti-Al-Hf-Cr [1].

1.3.2 Сплави системи Nb-Si-Mo

Виливки системи Nb-Mo-Si-Cr виготовляли вакуумним плавленням. Виливки переплавляли п'ять разів у мідному тиглі з водяним охолодженням. Після плавлення його відпалювали при температурі 1400 °C протягом 10 год у атмосфері високого вакууму ($\sim 10^{-5}$ тор) для концентраційної гомогенізації сплаву [8].

Для гідрування злиток нагрівали до 600 °C зі швидкістю нагрівання 10 °C/хв і витримували 4 години в атмосфері водню. Вилитий гідрогенізований сплав подрібнювався дробаркою та у кульовому млині. Кульове подрібнення проводилося в ємності з нержавіючої сталі 1000 куб. см, а в якості подрібнювального середовища використовувалися кульки з карбіду вольфраму діаметром 5 мм. Відношення порошку до кульок становило 1:5 за вагою. Сталевий контейнер продували аргонem високої чистоти, щоб запобігти забрудненню киснем, і подрібнення проводили протягом 3 годин зі швидкістю обертання 200 об/хв. Після подрібнення порошки просіювали через сітки розміром від 25 до 63 мкм. Для дегідрування порошки нагрівали до 600 °C зі швидкістю нагрівання 10 °C/хв і витримували протягом 3 годин у атмосфері високого вакууму (10^{-5} тор). Мікроструктуру злитка спостерігали за допомогою трансмісійного електронного мікроскопа, оснащеного енергетично-дисперсійним спектрометром. Кристалічні структури зразків досліджували за допомогою рентгенівського дифрактометра (XRD) із випромінюванням Cu K $_{\alpha}$ в діапазоні 2 θ

30-75°. Фазу дегідрогенізованого порошку спостерігали за допомогою трансмісійного електронного мікроскопа. Концентрацію водню у зразках оцінювали за допомогою аналізатора O/N/H (Leco, серія 836), і вимірювання проводилися п'ять разів для кожного зразка. Розподіл розміру порошку аналізували за допомогою аналізатора розміру порошку (Malvern, Mastersizer 3000) [8].

Сплави системи Nb-Si-Mo готували дуговим плавленням у водяному охолодженому мідному тиглі в атмосфері аргону. Злитки були переплавлені кілька разів для забезпечення однорідності складу. Зразки розмірами 10-10-5 мм були піддані електророзрядній обробці (EDM) для аналізу мікроструктури. Крім того, зразки сплаву системи Nb-Si-Mo були вирізані на різних ділянках злитка, щоб спостерігати вплив швидкості охолодження на морфологію первинної фази Nb₅Si₃ та для вивчення мікроструктури [11].

1.3.3 Сплави системи Nb-Si-Ti

Злиток головного сплаву системи Nb-Ti-Si-Cr-Al-Hf був виготовлений методом дугового плавлення [3].

1.3.4 Сплави системи Nb-Si-B

Для структурних застосувань за високих температур розглянуто багатофазні сплави системи Me-B-Si (Me – вогнетривкі метали) [26]. Досліджували шляхи формування та фазову стійкість сплавів системи Nb-Si-B, багатих на ніобій, отриманих методами дугового переплаву сплавів з наступною термообробкою зразків. Головними фазами, що спостерігалися в досліджуваній області, були Nb_{ss}, T₂-фаза та D₈₈-фаза. Схожа мікроструктура всіх сплавів вказує на формування евтектики Nb_{ss} + T₂ в останній частині діаграми формування. Після термічної обробки декількох сплавів було виявлено двофазне поле Nb_{ss}-T₂ на рівні 1700 °C. На основі експериментів DTA, двофазне поле Nb_{ss}-T₂ повинно бути стабільним до 2150 °C.

Матеріали на основі інтерметалічних матеріалів були розглянуті для структурних застосувань за високих температур на основі низької щільності, хороших механічних властивостей та підвищеної стійкості до окислення багатьох сполук. В останніх дослідженнях оцінено потенціал сплавів систем Mo-B-Si та Nb-Si-B [26]. Єдина інформація, що стосується фазових рівноваг у системі Nb-Si-B, пов'язана з Новотню та ін., котрий запропонував ізотермічний розріз для цієї системи за температури 1600 °C (рис. 1.5) [26].

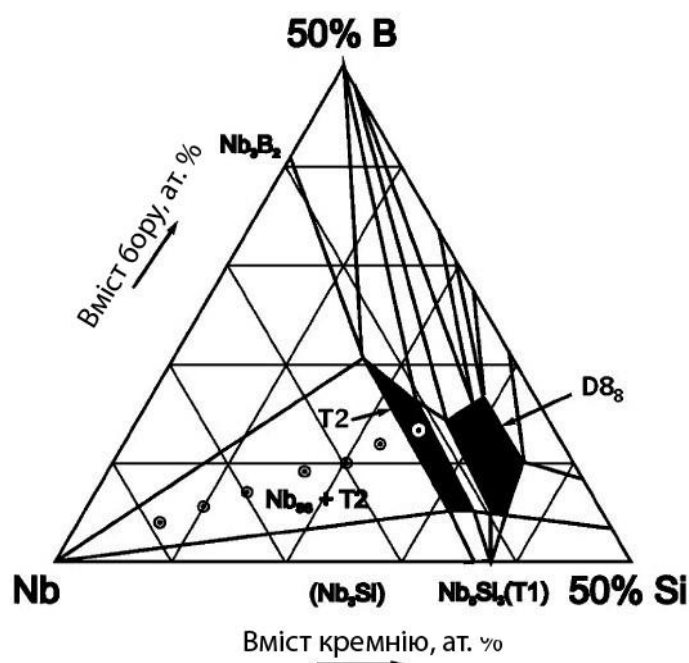


Рисунок 1.5 – Ізотермічний розріз системи Nb-B-Si за температури 1600 °C [26]

Фаза, ідентифікована як T2, утворюється за рахунок часткової заміни кремнію на бор у фазі Nb_5Si_3 системи Nb-Si. Процес кристалізації сплавів, збагачених ніобієм зі складом у вертикальному розрізі Nb-Nb₅Si₂B (T2-фази) показав наявність фаз Nb_{ss}, T₂ та D₈₈. Перехід від Nb_{ss} до T₂ відбувається між наступними складами: 84Nb-10Si-6B та 80Nb-13Si-7B (ат. %). Всі виплавлені сплави різняться наявністю евтектики Nb_{ss} + T₂ в останній частині. Nb_{ss} + T₂ двофазні поля мають бути стабільними принаймні до 2150 °C [26].

Сплави в бінарній системі Nb-Si показують хорошу стійкість до повзучості, але в них низька в'язкість і опір до окиснення. Їх властивості можуть бути покращені шляхом додавання металів. Високий вміст силіцидів одночасно покращує стійкість до окиснення та знижує в'язкість і пластичність за кімнатної та проміжної температурах.

Порошкова металургія широко використовується в лабораторних умовах для виготовлення зразків Nb-Si, необхідних для випробувань на механічні, мікроструктурні та окислювальні характеристики. На відміну від сплавів Mo-Si-B, для поліпшення властивостей сплавів Nb-Si необхідне комплексне легування; наприклад, поліпшення окислення фази Mo_{ss} поліпшується шляхом додавання досить високих кількостей Ti, Cr, Al, що знижує температуру плавлення квазіевтектичного сплаву. Термомеханічна обробка литих сплавів тільки частково дозволяє поліпшити властивості [25].

Підхід, що застосовується порошковою металургією, дає можливість поліпшення мікроструктури та технологічних властивостей за температур значно нижчих, ніж точка плавлення.

По-перше, дослідження проводились на двофазних матеріалах Nb-Nb₅Si₃, одержаних реактивним гарячим пресуванням порошкових сумішей Nb + Si або гарячим одноосним пресуванням порошкових сумішей Nb+Nb₅Si₃ [25].

Сплави зі складнішим складом з дев'ятьма елементами повинні бути виготовлені з використанням попередньо легованих порошків, отриманих або в лабораторних умовах шляхом дроблення та фрезерування з розплавленим розчином або розпиленням в середовищі інертного газу.

Ущільнення попередньо легованих порошків, зазвичай, виконується екструзією або використанням нових процесів, таких як іскро-плазмове спікання [25].

Якщо мікроструктура екструдованого сплаву є відносно грубою, то її можна подрібнити за допомогою термічної обробки. На даний час досліджуються механічні властивості цих сплавів та оптимізовано мікроструктуру шляхом попередньої підготовки порошку та термічної обробки [25].

Механічні властивості ряду сплавів Nb, Cr, Al, Ti, Hf, Si, включаючи міцність, руйнування та втомну поведінку, а також стійкість до повзучості, були розглянуті Бьюлі та його колегами [25].

Сплав із вогнетривкими елементами спричиняє дуже високу міцність та стійкість до повзучості. Опір до повзучості є однією з основних властивостей для оптимізації, якщо метою є застосування високотемпературних приладів для обертових компонентів [25].

1.4 Властивості матеріалів для газотурбінобудування

Для матеріалів газотурбінних двигунів в більшості випадків використовують жароміцні сплави. Характерною особливістю жароміцних сплавів є їх висока міцність за робочих температура газовой турбіни. Як показала практика, ГЦК гратка забезпечує високу пластичність, міцність, опір повзучості до більш високих температур ніж ОЦК гратка, що зумовлено дією кількох факторів, серед яких особливе місце займають високі показники модуля пружності та коефіцієнту дифузії в ГЦК гратці легувальних елементів [27].

Найбільше значення має висока розчинність багатьох елементів в матриці та здатність контрольованого виділення інтерметалідів, наприклад, карбідів. Це дає змогу отримувати сплави для деталей будь-якого спрямування.

Густина жароміцних сплавів варіюється в межах від 7,0 до 8,6 г/см³ [30]. Цей показник має важливе значення під час конструювання деталей які обертаються. Наприклад, заміна матеріалу лопаток турбіни з густиною 7,7 г/см³ на сплав з густиною 7,0 г/см³ збільшує експлуатацію диска турбіни в три рази.

Важливим показником для матеріалів деталей газових турбін є коефіцієнт термічного лінійного розширення (КТЛР), оскільки ефективність роботи турбіни залежить від допусків [27].

1.5 Висновки та постановка задач дослідження

Одними з найбільш перспективних матеріалів для високотемпературних застосувань є металокерамічні сплави системи Nb-Si-Me, оскільки вони мають низьку питому вагу (порядку 6,3-7,3 г/см³), стійкість до окиснення в широкому інтервалі температур. Тому метою роботи є одержання, структура та властивості евтектичних сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti), одержаних електронно-променевим оплавленням.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

1. Методом електронно-променевого оплавлення отримати евтектичні сплави систем Nb-Si-B, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Mo.
2. Вивчити мікроструктуру та хімічний склад фазових складових сплавів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Mo.
3. Дослідити мікромеханічні властивості одержаних сплавів.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У процесі виконання роботи одержуються дослідні зразки евтектичних сплавів системи Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Mo, Nb-Si-Ti.

Одержання сплавів системи Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) включає в себе дозування порошків, приготування сумішей, пресування та електронно-променеве оплавлення (спікання).

Технологічна схема одержання сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) показана на рисунку 2.1.

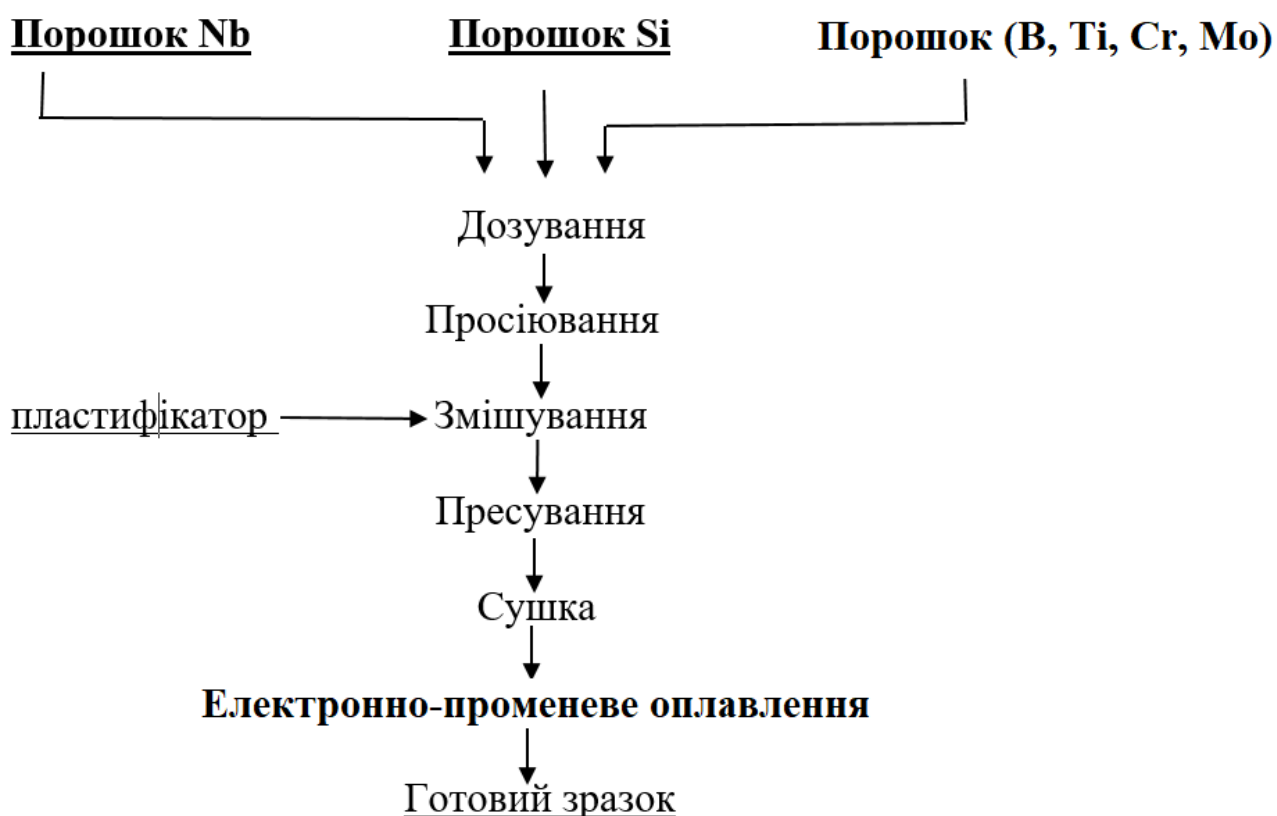


Рисунок 2.1 – Технологічна схема одержання сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti)

2.1 Вихідні матеріали

Вихідні матеріали: порошок ніобію чистотою вище 98,67% та дисперсністю менше 40 мкм, порошок титану, хрому, молібдену та кремнію чистотою вище 98,5% виробництва Донецького заводу хімічних реактивів.

Згідно діаграм стану систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) (рис. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 відповідно) встановлюється та розраховується склад сплавів, ат. %: Nb-6Si-25Cr, Nb-6Si-30Cr, Nb-6Si-35Cr, Nb-20Si-2Mo, Nb-20Si-4Mo, Nb-20Si-6Mo, Nb-20Si-22Ti, Nb-20Si-24Ti.

Для розрахунку маси наважки необхідно перерахувати атомні відсотки в масові за формулою:

$$\text{мас}\%(A) = \frac{\text{ат}\%(A) \cdot M(A)}{\text{ат}\%(A) \cdot M(A) + \text{ат}\%(B) \cdot M(B) + \text{ат}\%(C) \cdot M(C)},$$

де $M(A)$ – молярна маса компонента А;

А, В, С – компоненти наважки.

Дані розрахунків наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вміст елементів у сплавах

| ат. % | Nb | мас. %(Si) | мас. %(Cr) | мас. %(Ti) | мас. %(Mo) | мас. %(B) |
|--------------|------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| Nb-25Si-13B | 87,2 | 10,6 | | | | 2,2 |
| Nb-6Si-25Cr | 81,4 | 2,2 | 16,5 | | | |
| Nb-6Si-30Cr | 77,5 | 2,2 | 20,3 | | | |
| Nb-6Si-35Cr | 73,4 | 2,2 | 24,4 | | | |
| Nb-20Si-2Mo | 90,6 | 7 | | | 2,4 | |
| Nb-20Si-4Mo | 88,2 | 7 | | | 4,8 | |
| Nb-20Si-6Mo | 85,8 | 7 | | | 7,2 | |
| Nb-20Si-22Ti | 76,9 | 8 | | 15 | | |
| Nb-20Si-24Ti | 75,3 | 8,1 | | 16,6 | | |

Розрахунок щільності безпористого матеріалу проводився за формулою:

$$\rho_k = \frac{100 \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3}{\gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot a_3 + \gamma_2 \cdot a_1 \cdot \gamma_3 + \gamma_3 \cdot \gamma_1 \cdot a_2'}$$

де ρ_k – густина безпористого матеріалу;

γ – густина матеріалу;

a – вміст в масових відсотках матеріалу.

Дані розрахунків наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Компактна густина та маса наважок зразків

| Сплав, ат% | Густина, ρ_k , г/см ³ | Маса, г |
|--------------|---------------------------------------|---------|
| Nb-25Si-13B | 6,39 | 3,87 |
| Nb-6Si-25Cr | 7,87 | 1,87 |
| Nb-6Si-30Cr | 7,81 | 1,86 |
| Nb-6Si-35Cr | 7,74 | 1,84 |
| Nb-20Si-2Mo | 7,24 | 1,72 |
| Nb-20Si-4Mo | 7,26 | 1,73 |
| Nb-20Si-6Mo | 7,29 | 1,73 |
| Nb-20Si-22Ti | 6,36 | 1,51 |
| Nb-20Si-24Ti | 6,28 | 1,87 |

Розраховано об'єм пресовки $V = 1 \text{ см}^3$, за формулою:

$$V = \pi \cdot h \cdot d^2 / 4,$$

де h – довжина пресовки, см;

d – діаметр пресовки, см.

Дозування порошків проводиться на лабораторних терезах, змішування на лабораторних ситах. В якості пластифікатора вводиться полівініловий спирт у вигляді 5 % водного розчину в кількості 20 мл на 100 грамів суміші. Суміш протирається через сито, а потім надходить на операцію пресування. Наважки порошку розраховуються за формулою:

$$G=V*\rho_k(1-\Pi)*K,$$

де G – маса порошку (г);

V – об'єм пресовки (см³);

ρ_k – густина безпористого матеріалу (г/см³);

Π – пористість пресовки;

K – коефіцієнт ($K=1,01$).

Дані розрахунків наведено у таблицях 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.3 – Маса порошку кожного елемента в наважці

| Склад порошку, ат. % | маса Nb, г | маса Si, г | маса Cr, г | маса Ti, г | маса Mo, г | маса B, г |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Nb-25Si-13B | 3,375 | 0,41 | | | | 0,09 |
| Nb-6Si-25Cr | 1,52 | 0,04 | 0,31 | | | |
| Nb-6Si-30Cr | 1,44 | 0,04 | 0,38 | | | |
| Nb-6Si-35Cr | 1,35 | 0,04 | 0,49 | | | |
| Nb-20Si-2Mo | 1,56 | 0,12 | | | 0,04 | |
| Nb-20Si-4Mo | 1,52 | 0,12 | | | 0,08 | |
| Nb-20Si-6Mo | 1,49 | 0,12 | | | 0,12 | |
| Nb-20Si-22Ti | 1,16 | 0,12 | | 0,23 | | |
| Nb-20Si-24Ti | 1,12 | 0,12 | | 0,25 | | |

2.2 Пресування циліндрів

Пресування циліндру сплаву системи Nb-Si-B висотою 5 мм і діаметром 10 мм та сплавів систем Nb-Si-(Cr-Ti-Mo) висотою 5 мм і діаметром 10 мм здійснюється на гідравлічному пресі під тиском 150-200 МПа. Після пресування зразок розміщується на скляну пластинку, кладеться на дно металічного листа і піддається сушці.

2.3 Сушка циліндрів

Сушка проводиться для підвищення міцності пресовок за рахунок полімеризації пластифікатора, а також для видалення вологи з заготовок. Сушка зразку проводиться протягом 2 годин за температури 150-200 °С в вакуумній сушильній шафі.

2.4 Електронно-променеве оплавлення

Наступною операцією отримання сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti) це електронно-променеве оплавлення в установці ЭЛА-6. Фізичною основою процесу електронно-променевої плавки є перетворення кінетичної енергії електронів, розігнаних у електричному полі до швидкості 10^4 - 10^5 м/с, у теплову, в той час коли вони гальмуються у поверхневому шарі матеріалу. Електронно-променева гармата формує потік прискорених електронів (електронний промінь). Джерелом вільних електронів у гарматі є термокатод з гексабориду лантану. Емітовані електрони прискорюються у електричному полі, створеному між катодом та анодом (різниця потенціалів 20-45 кВ), і крізь отвір у аноді сформований пучок електронів подається у променепровід, у якому

електромагнітні лінзи забезпечують фокусування електронного променя та його відхилення у заданому напрямку.

Головною перевагою електронно-променевого оплавлення є можливість, незалежно від процесу плавки, плавно та в широких межах змінювати потужність тепла, котре закладається, а також конфігурувати зони нагріву.

2.5 Дослідження мікроструктури та хімічного складу

Для вивчення структури отриманих сплавів спочатку вттовляється мікрошліф, технологія виготовлення якого складається з послідовного виконання наступних операцій: вирівнювання поверхні грубим шліфуванням; тонке шліфування; полірування. Після, полірування мікрошліф промивають водою, висушують теплим повітрям або фільтрувальним папером [28].

Для вивчення структури та хімічного складу використовують растровий електронний мікроскоп (РЕМ-106И) (рис. 2.2). Його перевагами є те, що можна отримати значно більші збільшення та різкість отриманих зображень. Також визначається хімічний склад фаз за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу.



Рисунок 2.2 – Растровий мікроскоп Selmi РЭМ 106

Під час застосування растрової електронної мікроскопії досягається високий вакуум в камері (10^{-3} Па). Електрони з катоду вибиваються та створюють високу напругу між катодом та анодом. Випромінювання юстується та фокусується за допомогою групи спеціальних електромагнітних лінз.

Вибиті електрони (первинне випромінювання) взаємодіють зі зразком, в якому після цього утворюються різні за своєю природою сигнали.

Для отримання зображення в РЕМ використовують насамперед вторинні електрони (SE) та відбиті електрони (BSE – back scattered electrons). На зображенні, що одержуються із вторинних електронів можна розрізнити топографію поверхні зразку. За допомогою енергетичного (EDS) або хвильового дисперсивного (WDS) рентгенівського спектрометра можливе проведення аналізу на хімічний склад в мікрометричній області.

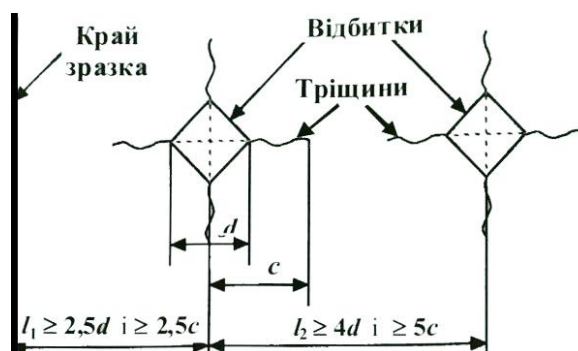
2.6 Вивчення мікромеханічних властивостей

Дослідження мікротвердості проводиться під час випробування за схемою вдавлювання наконечником (індентором) – алмазною пірамідкою із квадратною основою, що втискається у зразок з навантаженням від 2 до 200 г. Величину навантаження обирають залежно від розміру структурної складової та їхньої твердості.

Мікротвердість сплавів досліджується за стандартною методикою на мікротвердомірі ПМТ-3 під час навантаження на алмазну пірамідку 100 г.

Прилад працює за принципом вдавлювання. Наконечником (індентором) слугує алмазна пірамідка із квадратною основою й кутом біля вершини між протилежними гранями 136 град (метод Вікерса) [28].

Припустимі та неприпустимі відбитки під час випробування на мікротвердість та тріщиностійкість методом вдавлювання індентором Вікерса вказано на рисунках 2.3-2.5.



c – відстань від центра відбитку до кінця тріщини; d – довжина діагоналі відбитку;

l_1 – відстань від центру відбитку до краю зразку;

l – відстань між центрами сусідніх відбитків

Рисунок 2.3 – Вимоги до умов випробувань на мікротвердість та тріщиностійкість методом вдавлювання індентором Віккерса



Рисунок 2.4 – Відбитки індентора Віккерса, припустимі для вимірювання

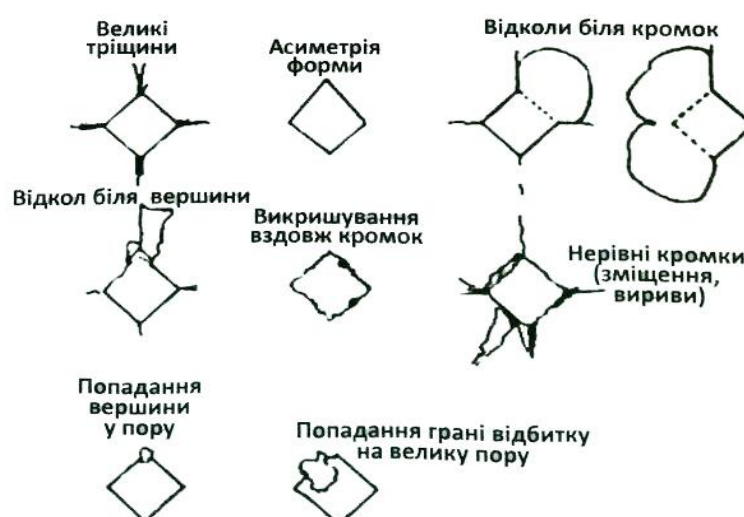


Рисунок 2.5 – Відбитки індентора Віккерса, неприпустимі для вимірювання

Мікротвердість розраховується при навантаженні 1 Н за формулою:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}, \quad (2.5)$$

де Р – навантаження, Н;

d – довжина діагоналі відбитка, м.

Дані розрахунків наведено у таблиці 2.4.

Тріщиностійкість розраховується при навантаженні 10 Н за формулою:

$$K_{1C} = 0,075 \frac{P}{a^{\frac{3}{2}}},$$

де Р – навантаження, Н;

a – половина відбитка з тріщиною, мкм;

Таблиця 2.4 – Результати дослідження мікротвердості сплавів

| Сплави, ат. % | Мікротвердість Нμ, ГПа |
|---------------|------------------------|
| Nb-25Si-13B | 19,404 |
| Nb-6Si-25Cr | 7,59 |
| Nb-6Si-30Cr | 7,87 |
| Nb-6Si-35Cr | 8,66 |
| Nb-20Si-2Mo | 4,72 |
| Nb-20Si-4Mo | 8,35 |
| Nb-20Si-6Mo | 6,2 |
| Nb-20Si-22Ti | 3,56 |
| Nb-20Si-24Ti | 4,84 |

Дані розрахунків наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати дослідження тріщиностійкості сплавів

| Сплави, ат. % | Тріщиностійкість, K_{IC} , МПа*м ^{-1/2} |
|---------------|--|
| Nb-25Si-13B | 1,74 |
| Nb-6Si-25Cr | 3,6 |
| Nb-6Si-30Cr | 4 |
| Nb-6Si-35Cr | - |
| Nb-20Si-2Mo | - |
| Nb-20Si-4Mo | 3,1 |
| Nb-20Si-6Mo | - |
| Nb-20Si-22Ti | - |
| Nb-20Si-24Ti | 2,1 |

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розглянемо кристалізацію евтектичного типу. Проаналізуємо фазові перетворення в двоєвтектичному сплаві I під час зниження температури [29].

За $T = T_1$ в рівновазі знаходиться рідка фаза P_{c1} [29].

За $T = T_2$ настає двофазна рівновага $P_{c2} \leftrightarrow a_{c2}$, [29].

За $T = T_3 = T_2 - \Delta T_1$ (де ΔT_1 – переохолодження, при якому зароджуються і ростуть кристали a -фази) відбувається фазовий перехід $P_{c3} \rightarrow a_{c3'} + P_{c3''}$ [29].

Цей процес продовжується і при подальшому зниженні температури аж до T_4 . При цьому склад кристалів змінюється по лінії $3' - 4'$, а склад рідкої фази на границі з a -фазою по лінії $3'' - E$ [29].

За $T = T_4$ коли температура сплава досягає ізотерми трьохфазної евтектичної рівноваги $P_{cE} \rightarrow a_{c4'} + \beta_{c4''}$, в сплаві існують дві фази: первинні кристали a -твердого розчину і евтектична рідина (рис. 3.2, а) [29].

За $T = T_5 = T_4 - \Delta T_2$, (де ΔT_2 – переохолодження, необхідне для зародження і росту евтектичної складової) відбувається евтектична кристалізація: $a_1 + P_{cE} \rightarrow a_1 + (a + \beta)_{евт}$ [29].

Для виявлення рухаючої сили процесу виявимо перепади концентрацій в кожній фазі і шляху дифузійних потоків атомів компонентів [29].

Розподілення рівноважних локальних компонентів концентрацій на міжфазних границях показано на рисунку 3.2, б [29].

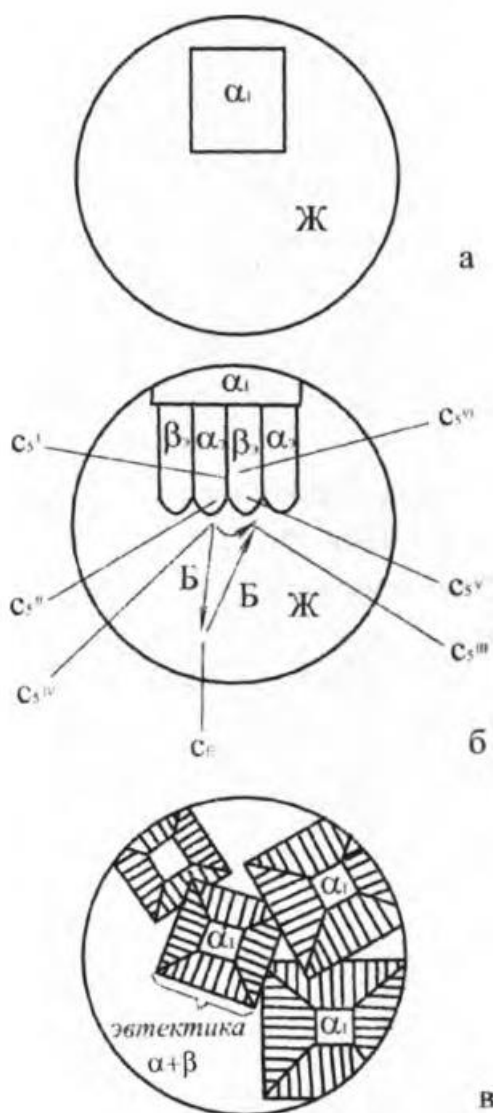


Рисунок 3.2 – Структурні складові і локальні дифузійні потоки в сплавi складу I (мікроскопічна фотографія) [29]

Металографічний аналіз сплаву системи Nb-Si-B проведений за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ 106И після електронно-променового оплавлення показав, що структура композитів представляє собою хаотично розташовані зерна різної морфології (неправильна, продовгувата) темної фази в матриці світлого кольору (рис. 3.3, 3.4).

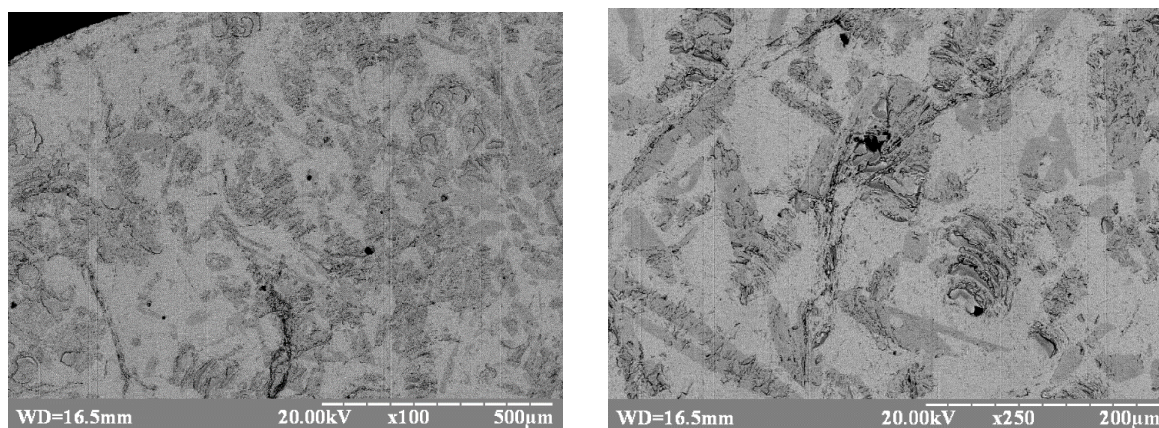
*a**б**a* – x100; *б* – x250

Рисунок 3.3 – Мікроструктура сплаву Nb-25Si-13B (ат. %)

Також зустрічається евтектика (рис. 3.4, а, б) - суміш двох (або кількох) речовин у такому співвідношенні, за якого температура плавлення її нижча, ніж температура плавлення суміші цих самих речовин в інших співвідношеннях. Можна припустити, що ця суміш складається з фаз Nb_5Si_3B та Nb_5Si_3 , котрі поєднують високу тріщиностійкість та міцність сплаву.

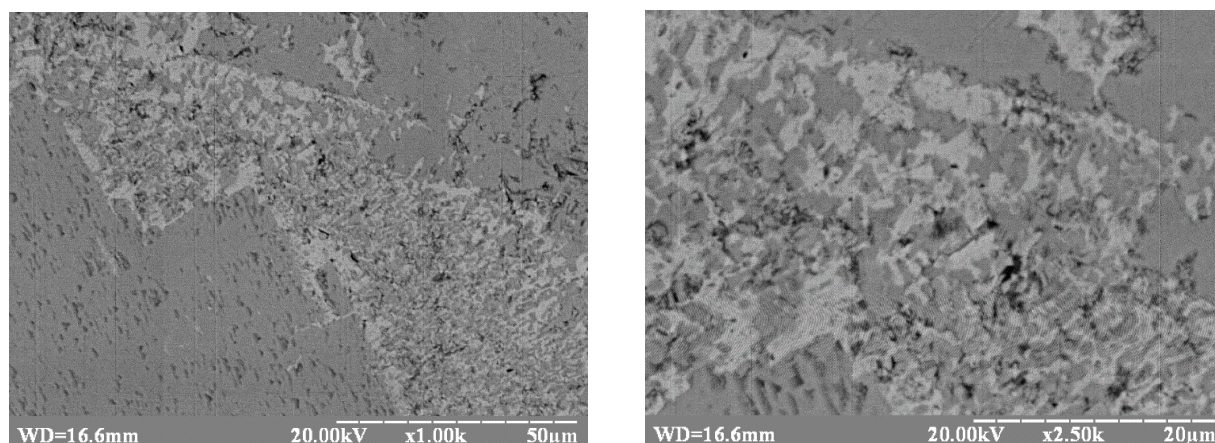
*a**б**a* – x1000; *б* – x2500

Рисунок 3.4 – Мікроструктура евтектичної області сплаву Nb-25Si-13B (ат. %)

На основі мікрорентгеноспектрального аналізу можна припустити наявність фаз (табл. 3.1) композиту Nb-25Si-13B. На основі проведеного дослідження можна припустити, що світла фаза це Nb, сіра - Nb₅Si₃B, темна - Nb₅Si₃ (рис. 3.5).

Таблиця 3.1 – Результати якісного хімічного аналізу (наявність фаз)

| Назва фази | Формула |
|---------------------|-----------------------------------|
| Ніобій Кремній | Nb ₅ Si ₃ |
| Ніобій | Nb |
| Боросиліциду Ніобію | Nb ₅ Si ₃ B |
| Силіцид ніобію | Nb ₃ Si ₂ |

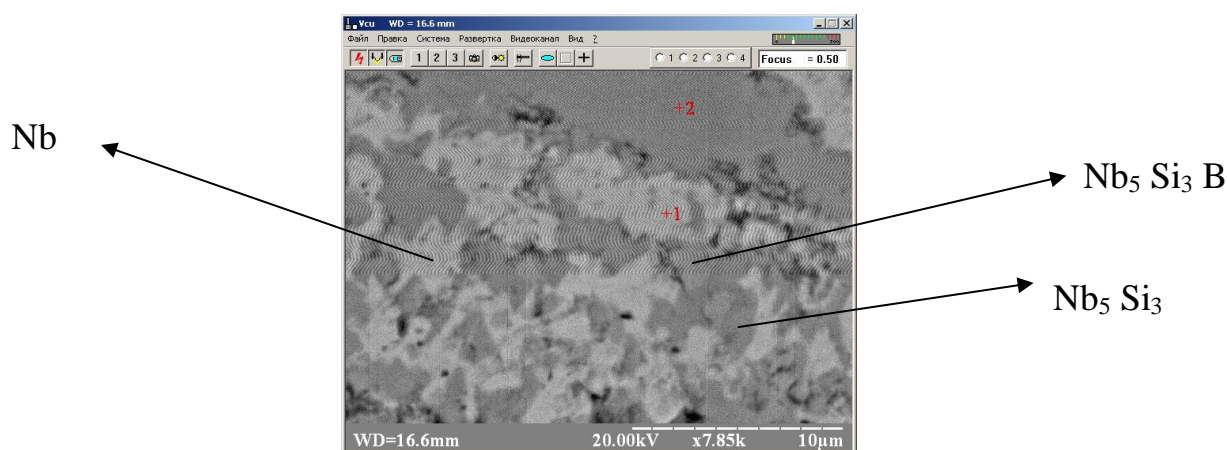
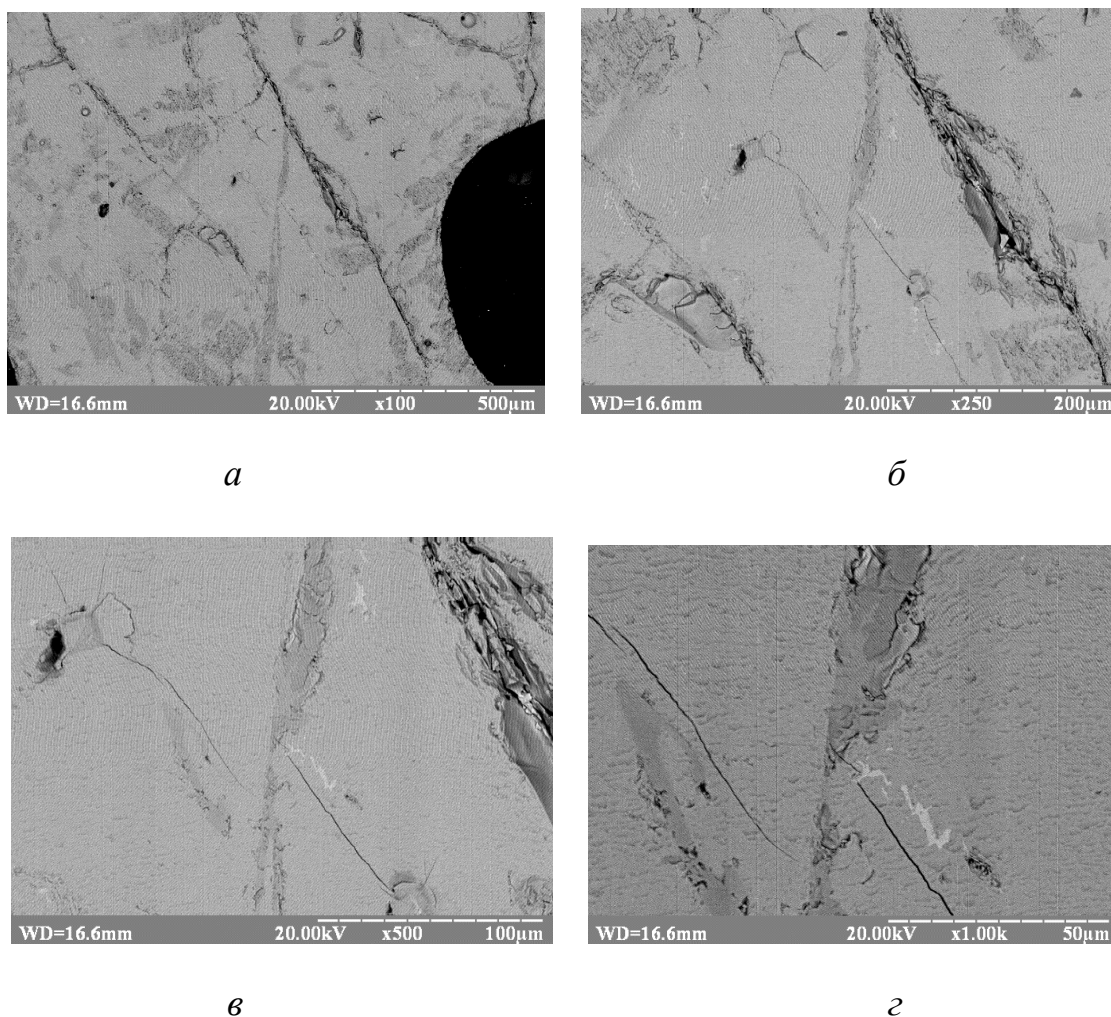


Рисунок 3.5 – Мікроструктура та хімічний склад композиту Nb-25Si-13B (ат. %)

У сплаві Nb-25Si-13B тріщини утворились за навантаження в 5 Н. Фаза Nb₅Si₃B має низьку тріщиностійкість, за рахунок високого значення твердості, як помітно на рисунку 3.6, має великі за довжиною тріщини, котрі закінчуються на границі переходу до фази Nb₅Si₃. Те що фаза Nb₅Si₃ слугує перешкодою для розповсюдження тріщин сплаву пояснюється тим, що ця фаза має вище значення тріщиностійкості, ніж фаза Nb₅Si₃B та для подолання шляху тріщині потрібно пройти через границі зерен, для чого потрібно більше енергії.



a – x100; *б* – x250; *в* – x500; *з* – x1000

Рисунок 3.6 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-25Si-13B (ат. %) з тріщинами

Проведений металографічний аналіз сплавів системи Nb-Si-Cr показав, що структура евтектичного сплаву Nb-6Si-25Cr представляє собою зерна різної форми рівномірно розташовані по площі зразка. Евтектика була виявлена в малій кількості та має дендритоподібну форми (рис. 3.7).

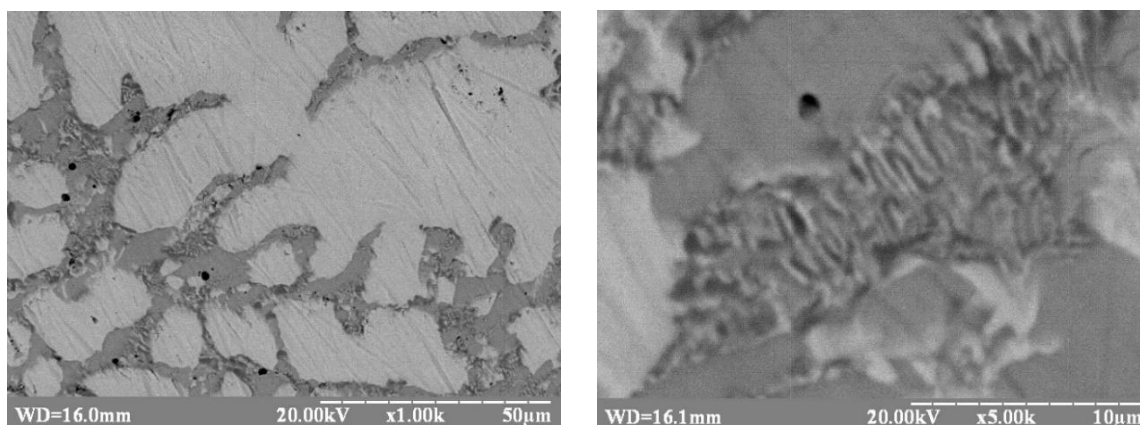
*a**б**a* – x1000; *б* – x5000

Рисунок 3.7 – Мікроструктура сплаву Nb-6 Si-25 Cr (ат. %)

Мікроструктура композиту Nb-6Si-30Cr представляє собою зерна різної форми (світла фаза), котрі хаотично розташовані по площі зразка. Евтетика представляє собою дендритний кристал з гілками, що взаємно проростають одна в одній (рис. 3.8).

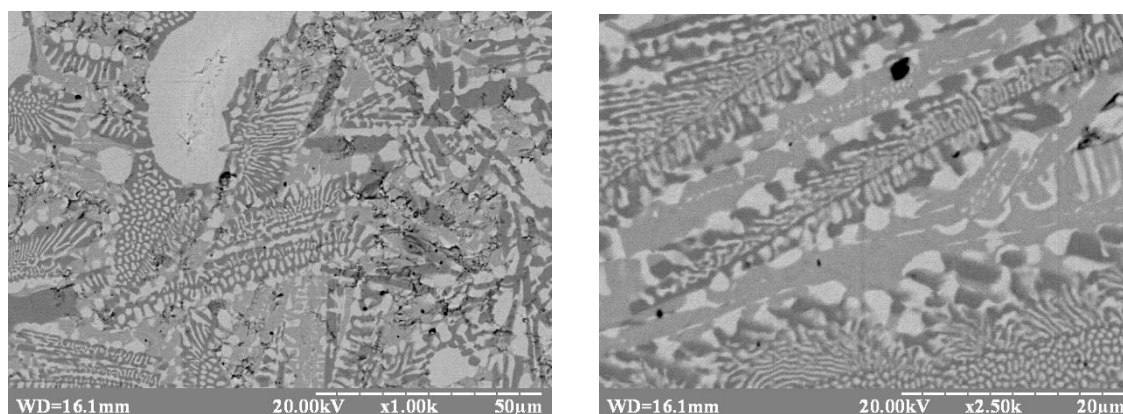
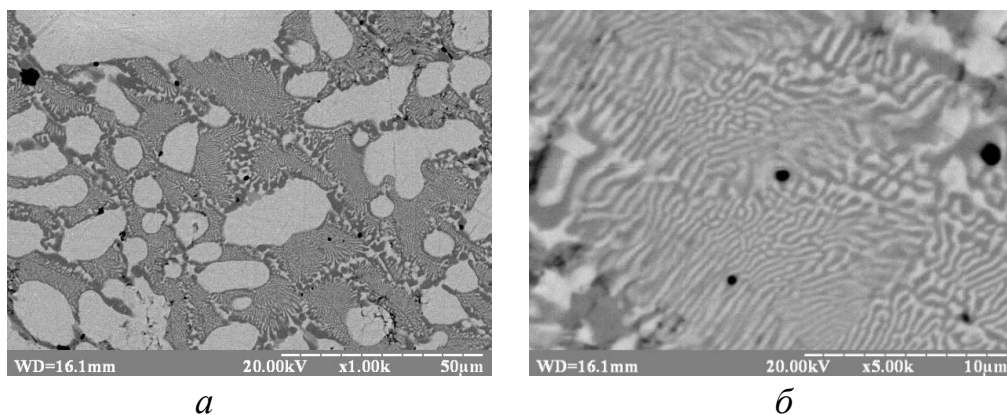
*a**б**a* – x1000; *б* – x2500

Рисунок 3.8 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-6Si-30Cr (ат. %)

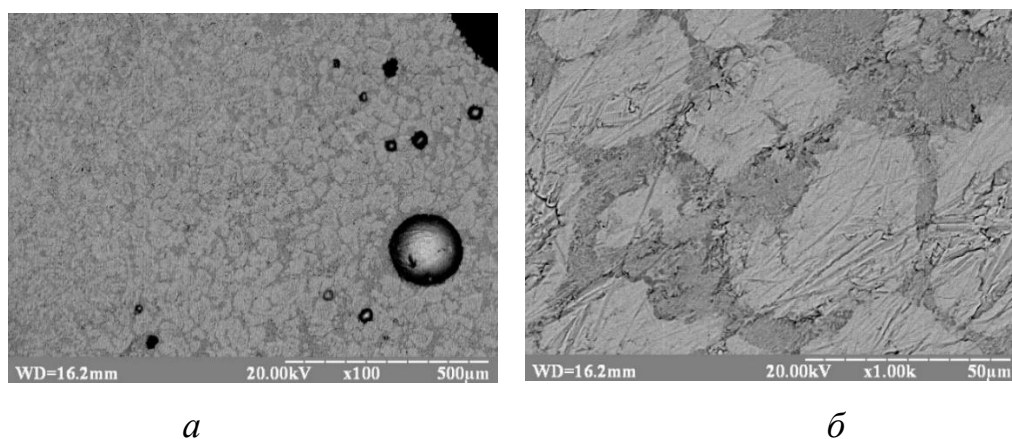
Структура композиту Nb-6 ат. % Si-35 ат. % Cr представляє собою евтектичну суміш, в якій розташовані зерна округлої форми світлої фази та евтектика котра оточує зерна світлої фази та має дендритну форму (рис. 3.9). На основі діаграми стану, мікрорентгеноспектрального аналізу та дослідження мікротвердості фазових складових можна припустити, що у сплавах наявні такі фази: світла - Nb, темна - Cr_2Nb та сіра - Nb_5Si_3 відповідно.



a – x1000; *б* – x2500

Рисунок 3.9 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-6Si-35Cr (ат. %)

Структура композиту Nb-20Si-2Mo представляє собою матрицю (темна фаза) та включення зerez світлої фари хаотичної форми рівномірно розподілених по площі зразку. Евтектики не виявлено (рис. 3.10).



a – x100; *б* – x1000

Рисунок 3.10 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-20Si-2Mo (ат. %)

Структура сплавів Nb-20Si-4Mo та Nb-20Si-6Mo представляє собою композит, який складається з евтектики та зерен світлої фази округлої форми та різних розмірів, розташованих рівномірно по площі зразку. В сплаві Nb-20Si-6 Mo зерна розташовані менш рівномірно, ніж у сплаві Nb-20Si-4Mo (рис.3.11, 3.12).

У трьох вищезгаданих сплавів спостерігаємо евтектичний ріст кристалів. На основі мікрорентгеноспектрального аналізу можна припустити, що світла область це фаза, багата на Nb та Mo, а темна область - $(Nb, Mo)_5Si_3$.

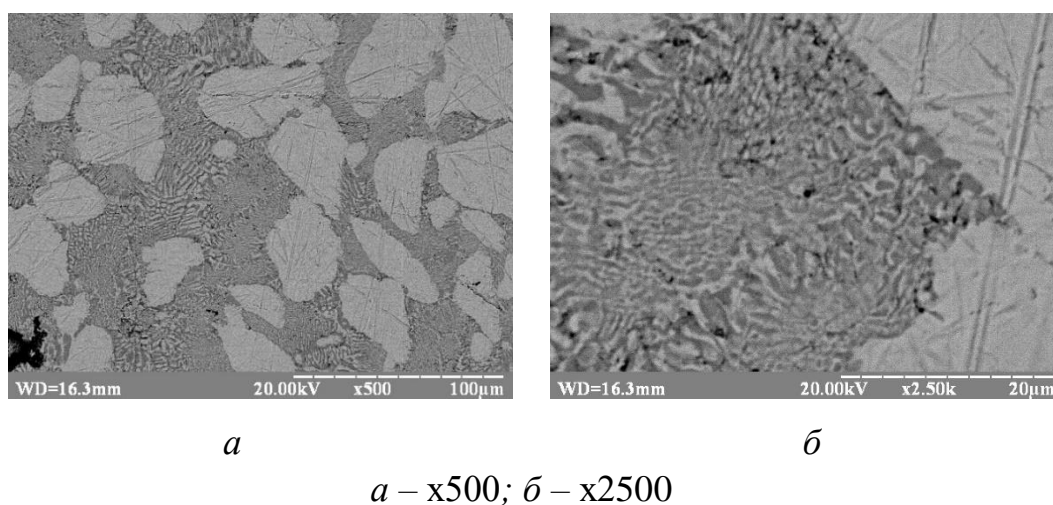


Рисунок 3.11 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-20Si-4Mo (ат. %)

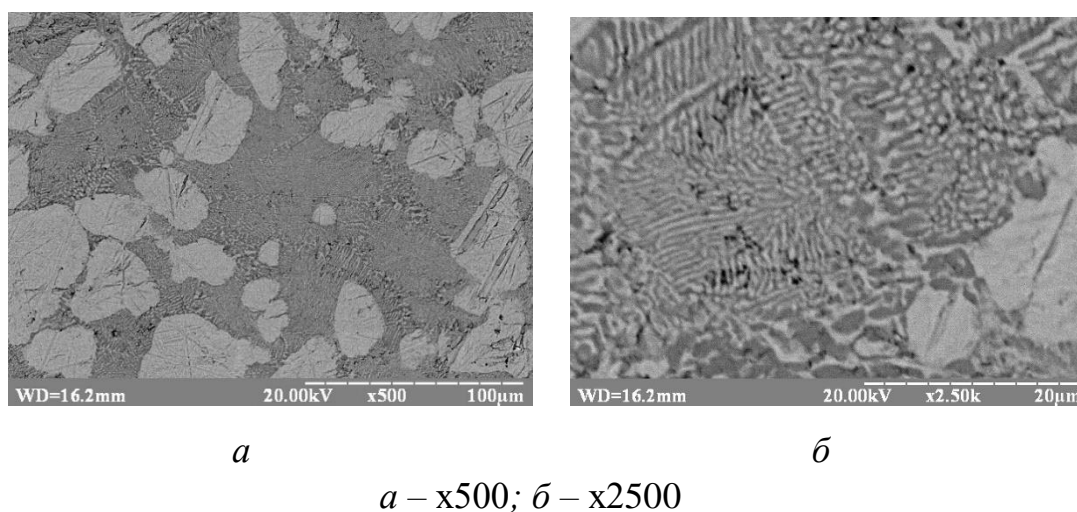


Рисунок 3.12 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-20Si-6Mo (ат. %)

Структура композитів Nb-20Si-22Ti (ат. %) та Nb-20Si-24Ti (ат. %) представляють собою суміш хаотично розташованих зерен (світлої та темної фаз) котрі мають різну форму та розміри (рис. 3.13, 3.14).

На основі мікрорентгеноспектрального аналізу можна припустити, що біла фаза – це Ti,Nb твердий розчин, темна фаза – $(\text{Ti,Nb})_3\text{Si}$.

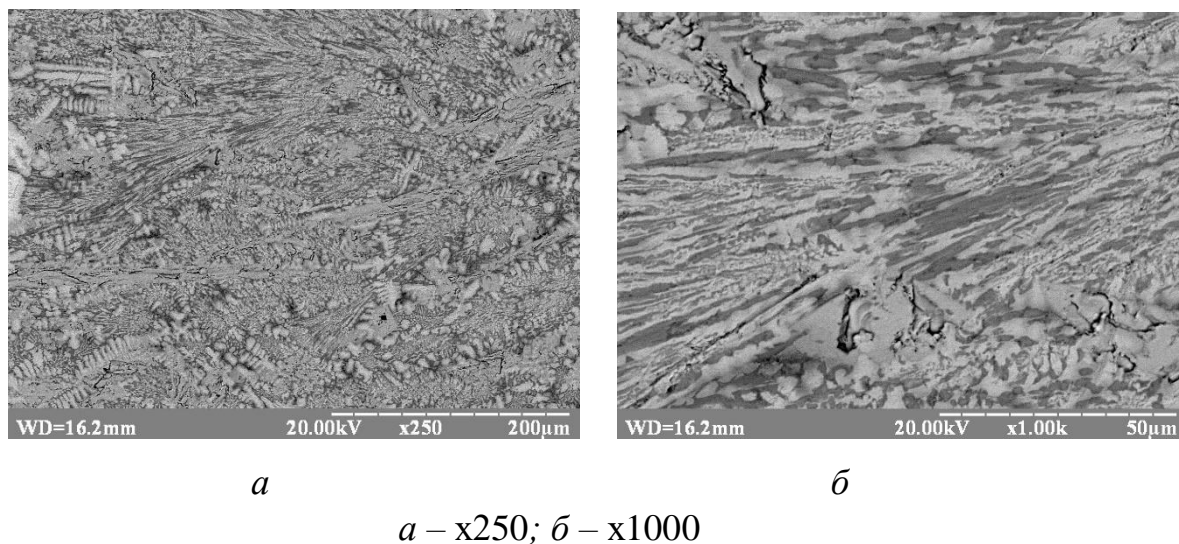


Рисунок 3.13 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-20Si-22Ti (ат. %)

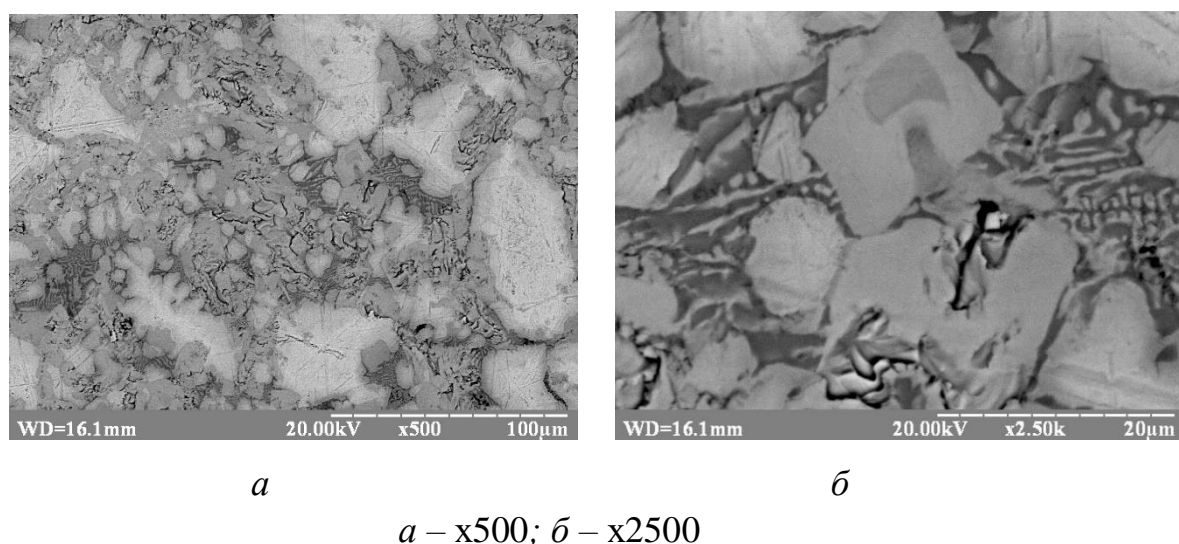


Рисунок 3.14 – Мікроструктура евтектичного сплаву Nb-20Si-24Ti (ат. %)

ДюрOMETричним аналізом визначено характеристики мікротвердості та тріщиностійкості для сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti). Показано, що найвищу мікротвердість має сплав Nb-25 ат. % Si-13 ат. % B - 19,404 ГПа та найменшу тріщиностійкість - $1,74 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1/2}$ відносно інших зразків. Найвищу тріщиностійкість серед зразків мають сплави Nb-6 ат. % Si-25 ат. % Cr та Nb-6 ат. % Si-30 ат. % Cr та мають середню мікротвердість серед зразків - 7,59 ГПа та 7,59 ГПа відповідно. У сплавах Nb-6 ат. % Si-35 ат. % Cr, Nb-20 ат. % Si-2 ат. % Mo, Nb-20 ат. % Si-6 ат. % Mo та Nb-20 ат. % Si-22 ат. % Ti тріщин навіть за навантаження в 10 Н не виявлено, мікротвердість - 8,66 ГПа; 4,72 ГПа; 6,2 ГПа; 3,56 ГПа відповідно (рис. 3.14-3.15).

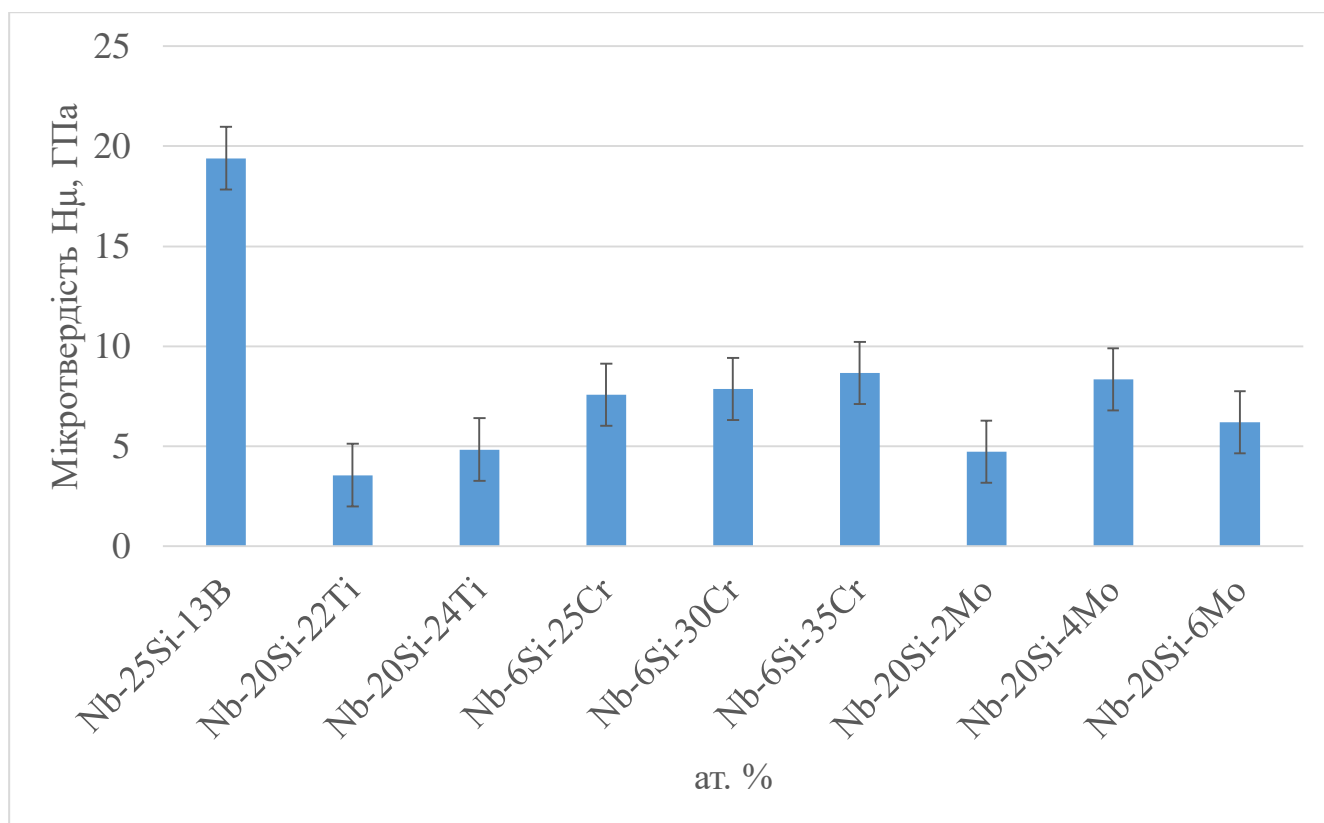


Рисунок 3.14 – Інтегральна мікротвердість сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti)

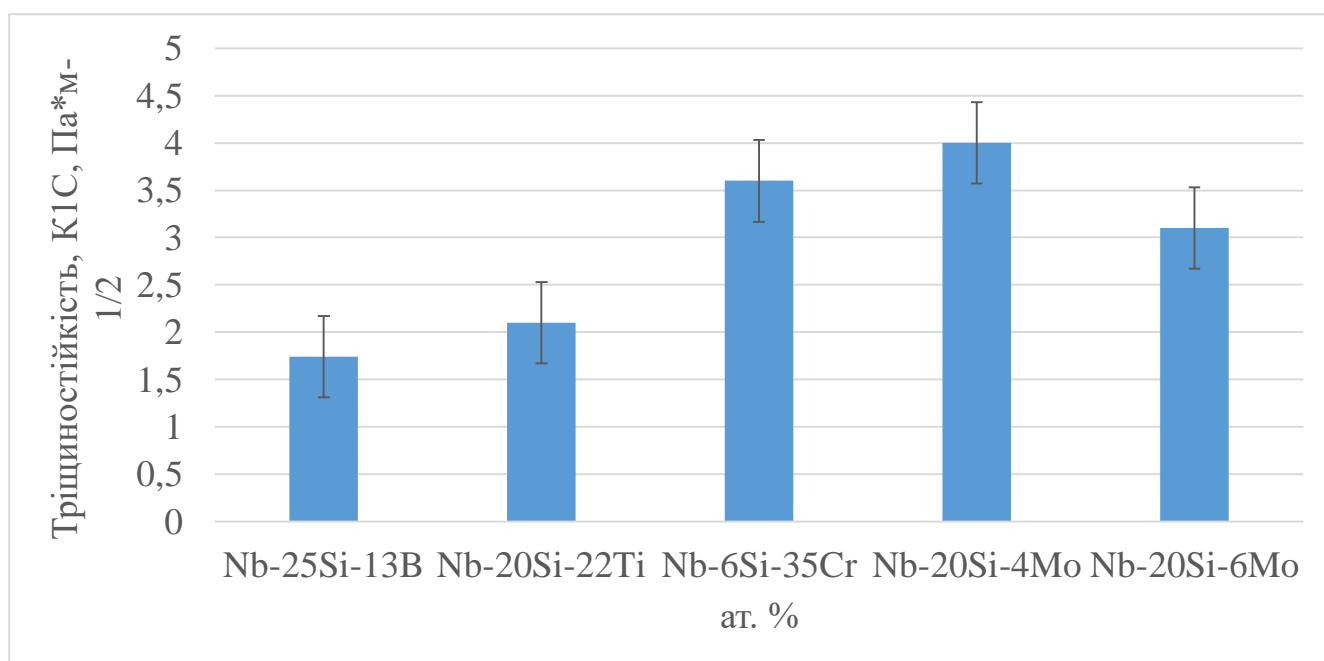


Рисунок 3.15 – Тріщиностійкість сплавів систем Nb-Si-(B, Cr, Mo, Ti)

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В цьому розділі проводиться аналіз впливу шкідливих факторів під час роботи з твердими сплавами тож під час проведення експерименту важливо дотримуватись вимог та правил безпеки, адже виробництво виробів з твердих сплавів несе багатогранну небезпеку, на кожному етапі є окремі фактори ризику, а саме: подразнення слизових оболонок носу, горла та захворювання легеневих тканин; можливість отримання опіків в разі загорання парів бензину; можливе отримання травм під час роботи на пресах; можливість бути ураженим електричним струмом у разі відсутності заземлення під час роботи з пічним обладнанням; можливість отримати пошкодження різної ступені важкості в разі не своєчасної перевірки балонів та інше.

На даний час діє наказ від 28.12.2017 № 2072 Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками [31].

Мета розділу – аналіз шкідливих та небезпечних факторів, які існують під час змішування та пресування суміші порошків Nb, Si, B, Cr, Ti, Mo, а також дослідження структури та властивостей сплавів системи Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Mo, Nb-Si-Ti та розробка заходів і засобів для їх усунення.

4.1 Безпека технологічних процесів

Одними із основних процесів, що використовувалися в цій роботі та несуть в собі потенційні ризики були: змішування, пресування, сушка та спікання.

Просіювання та змішування проходить із використанням вже подрібнених порошків ніобію, кремнію, бору, хрому, титану та молібдену з 5% пластифікатором полівінілового спирту. Безпосередній контакт усувається через використання гумових рукавиць. Також, використовується витяжка, щоб уникнути вдихання дрібних часток порошку та парів спирту.

Процес сушки прямої присутності не потребує, але потребує під час завантаження та вивантаженні зразків. Температури сушки відносно низькі (100 °C) і не потребують герметизації пічного обладнання. Процес діставання заготовок проходить із використання спеціальних вогнетривких рукавиць для унеможливлення вірогідності отримання опіку. Інфрачервоним випромінюванням можна знехтувати так як воно мале за температури 100 ° C та його вплив проявляється лиш під час завантаження та вивантаженні зразків з сушильної шафи.

Процес пресування може нести небезпечний фактор так як під час пресування може тріснути розбірна прес-форма або деталь котра піддається великому тиску та вилетіти з робочої зони кусок металу тим самим завдати шкоди. Але гідравлічний прес обладнаний металічним кожухом котрий унеможливує потрапляння деталі в людину. Навантаження невелике під час натискання на важіль гідравлічного пресу - 2т/см^2 що великих зусиль не потребує. Так як гідравлічний прес приводиться в дію фізичною силою, а саме натисканням руки на важіль, у випадку якщо щось піде не так (перекоситься пуансон або обладнання вийде з ладу то можна швидко відпустити важіль і дія преса припиниться, чим завадить подальшому руйнуванню обладнання.

Процес спікання є найнебезпечнішим із процесів. Приступати до роботи можна виключно після того, як наладчик чи майстер перевірить його справність.

Під час роботи на пічному обладнанні слід проводити заходи, що застерігають від ураження електричним струмом, тобто перевіряти повну справність електропроводів; обладнання повинно мати на корпусах елементи заземлення та бути надійно заземлено.

Найчастіше, під час роботи вакуумної печі використовується дифузійний паромасляний вакуумний насос через високу швидкість роботи. За безпечністю за загальними вимогами насос повинен відповідати ГОСТ 12.2.003-91. За методом захисту людини від ураження струмом дифузійні паромасляні насоси, що найчастіше використовуються в науково-дослідницьких установах, відносять до електрообладнання 1 класу за ГОСТ 12.2.007-75. Джерелом можливого ураження

людини електричним струмом є нагрівач та корпус насосу. Для попередження ураження електричним струмом якраз і виконують надійне заземлення цих елементів, шляхом під'єднання мідного провідника-заземлювача діаметром 3 мм до болта затискачу-заземлювача. Заземлення виконано згідно вимог ПУЕ 2017р.

Під час запуску та роботи печі необхідно дотримуватись строгої послідовності виконання операцій. Перед початком роботи необхідно увімкнути загальну вентиляцію, яка надалі повинна працювати безперервно. Необхідно впевнитися в щільності всіх сполучень та отворів в печах, перевірити справність трубопроводів, які проводять та відводять водень. Після цього здійснюється продувка печі до повного видалення повітря, не менше 40-45 хвилин для печей з графітотрубчатими нагрівачами та 30-35 хвилин для печей попереднього спікання.

Оператор, хоч і вільний в момент самого спікання, проте він повинен завжди бути на готові. В разі припинення потрапляння води в охолоджувальній системі та в разі розгерметизації вмикається звукова сигналізація. В разі припинення потрапляння води, слід спершу перевірити крани та патрубки. В разі неможливості швидкої поладки піч необхідно вимкнути.

Джерелом теплового випромінювання є піч опору з високою робочою температурою. Внаслідок тривалої роботи печі теплове випромінювання може привести до теплового удару та головного болю, до ослаблення уваги. Допустиме значення густини потоку ІЧВ, згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [31] складає 140 Вт/кв. м., за рахунок високої температури є висока небезпека опіків [9].

З метою захисту від теплового впливу та опіків під час роботи з нагрівальною піччю використовували спецодяг – рукавиці та спеціальний інструмент (металеві щипці) для завантаження та вивантаження тигля з досліджуваним зразком.

4.2 Вимоги до виробничих приміщень

Лабораторія 022-9 належить до приміщення з підвищеною небезпекою електротравм. У лабораторії 022-9 використовується струм напругою 220 В для живлення сушильної шафи та струм напругою 380 В для живлення установок печей для спікання.

Можливими випадками ураження електричним струмом у даній лабораторії є ураження під час пошкодження ізоляції і заземлення печей та електричного обладнання або під час пошкодження розетки.

Для того, щоб запобігти негативних наслідків лабораторія оснащена індивідуальним заземленням по периметру.

Небезпечні струмовідні частини електроустановки не доступні для випадкового прямого дотику, а доступні для дотику відкриті і сторонні провідні частини безпечні як за нормальних умов (експлуатація електроустановки за призначенням і без пошкодження), так і за умови одиничного пошкодження.

Основна ізоляція повністю покриває струмовідні частини і здатна витримувати механічні, електричні, хімічні, теплові та інші впливи, які виникають у процесі експлуатації. Усунення ізоляції повинно бути можливим тільки шляхом її руйнування. Для заводських виробів ізоляція відповідає стандартам або відповідним технічним умовам на це обладнання. Лакофарбові покриття та інші подібні покриття не вважаються ізоляцією, яка захищає від ураження електричним струмом. Якщо ізоляцію обладнують під час монтажу, її якість слід випробовувати за нормами, призначеними для перевірки якості ізоляції обладнання заводського виготовлення. У разі забезпечення основної ізоляції повітряним проміжком захист від прямого дотику до струмовідних частин або наближення до них на небезпечну відстань, у тому числі в електроустановках напругою понад 1 кВ, виконується за допомогою оболонок, огорож, бар'єрів або шляхом розміщення поза зоною досяжності що відповідає нормам ПУЕ-7 2017.

Робота проводиться в навчальному корпусі №9, в науково-дослідній лабораторії 022, характеристики приміщення в якому знаходиться робоче місце зведені в таблиці 4.1.

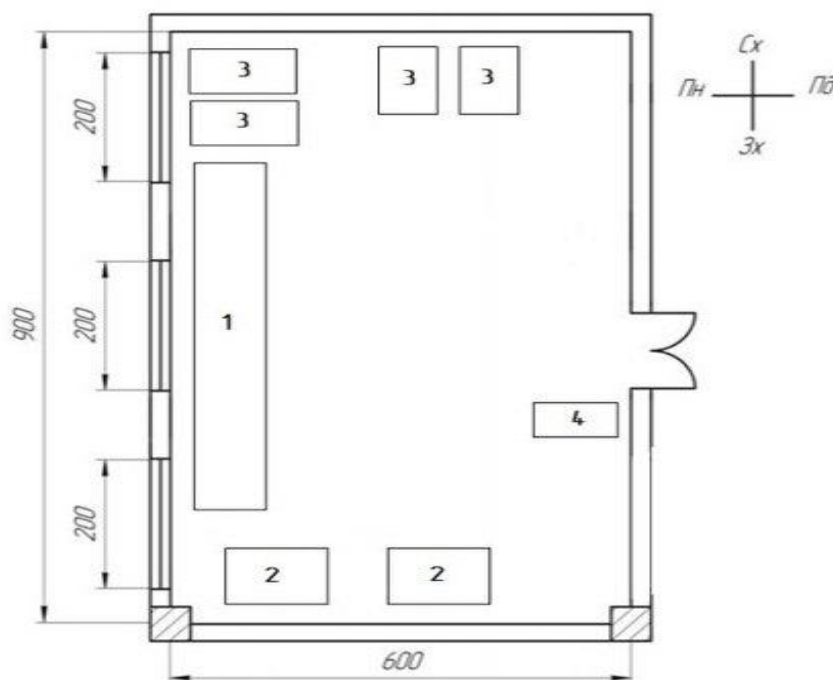
Відповідно до основних вимог до будівель виробничого призначення, які викладені в СНиП 2.09.02-85 [31], висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м³ та 4,5 м² відповідно на кожного працівника [32].

Таблиця 4.1 – Характеристики робочого приміщення

| | |
|----------------|-----|
| Довжина, м | 9 |
| Ширина, м | 6 |
| Висота, м | 4,5 |
| Площа, м. кв. | 54 |
| Об'єм, м. куб. | 243 |

Площа даного приміщення складає $S = 9 \cdot 6 = 54 \text{ м}^2$, а об'єм $V = 9 \cdot 6 \cdot 4,5 = 243 \text{ м}^3$. Під час досліджень в лабораторії працює 4 чоловіки, звідки отримуємо, що площа на одного чоловіка складає $S_{\text{ч}} = 54/4 = 13,5 \text{ м}^2/\text{чол.}$, а об'єм – $V_{\text{ч}} = 243/4 = 60,75 \text{ м}^3/\text{чол.}$

Отже, згідно СНиП 2.09.02-85 [31], приміщення за геометричними параметрами відповідає основним вимогам до будівель виробничого призначення [42]. План приміщення представлений на рисунку 4.1.



1 – робочий стіл; 2 – гідравлічний прес; 3 – піч спікання; 4 – сушильна шафа

Рисунок 4.1 – План дослідної лабораторії 022-9

Категорію важкості виконуваної роботи можна визначити як – Легка, 16 (ДСН 3.3.6.042-99 [31]). Ця категорія включає в себе легкі фізичні роботи, які супроводжуються деякою фізичною напругою та виконуються сидячи, стоячи і роботи пов'язані з ходьбою.

Значення показників температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для легкої I б категорії робіт у лабораторії 022 не відповідають оптимальним вимогам, але знаходяться в області допустимих для непостійного робочого місця в холодний та теплий період року [31].

У лабораторії № 022 можлива надзвичайна ситуація така, як пожежа. У даній лабораторії можливі пожежі класу А (горіння твердих речовин). Усі установки живляться електричним струмом, тому для їх гасіння використовуються вогнегасники типу ОУ–2, ОУ–5 (за напруги 220В) та порошкові вогнегасники (напруга до 1000 В) – МГС (порошок на основі графіту) ДСТУ EN 2:2014 [34]. У споруді передбачені технічні (лабораторія оснащена автоматичною пожежною сигналізацією, лабораторія обладнана внутрішнім

протипожежним водопроводом), організаційні (розроблено інструкції про міри пожежної безпеки, вивішені на поверхах плани евакуації (рис. 4.2), створено пожежно-технічну комісію) та режимні (обмеження числа осіб, що здійснюють експлуатацію устаткування, виділено визначені місця для паління) заходи щодо забезпечення пожежної безпеки.

Відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01 приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою відноситься до категорії Г (приміщення в яких знаходяться негорючі речовини та матеріали в гарячому, або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо) [33].

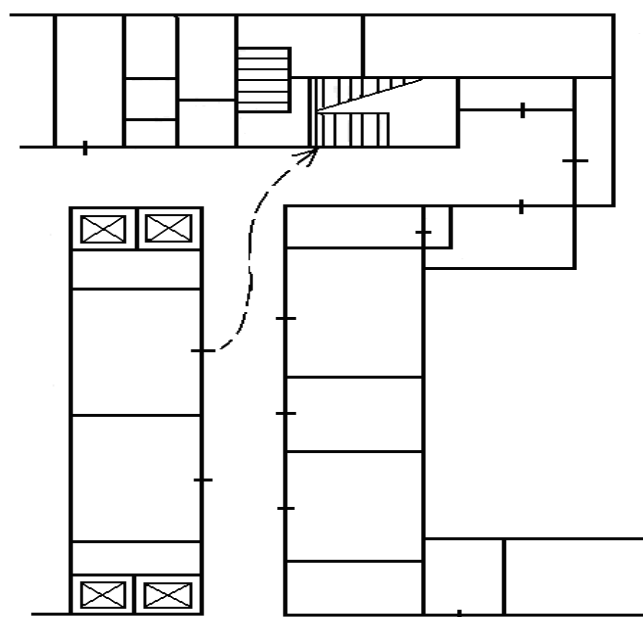


Рисунок 4.2 – План евакуації

Можливими причинами виникнення пожеж у приміщенні лабораторії можуть бути: коротке замикання в електричних ланцюгах, порушення правил пожежної безпеки під час використання побутових електронагрівальних приладів.

4.3 Безпека технологічного обладнання

Сушильна шафа, піч та прес повинні стояти на твердій рівній поверхні.

Про безпечність обладнання ми вже частково розказали в попередньому розділі. Очевидно, що всі елементи кожного із обладнань виготовлені із необхідних матеріалів. Так, футирований контейнер виготовлений із нержавіючої сталі, а внутрішні стінки футировані ВКЗ. Патрубки в печі виготовлені із прозорих матеріалів для можливості швидкої перевірки наявності потоку води. Корпус печі виготовлений із жароміцної сталі.

Також, можна згадати про процес пресування. Його головні елементи – поршень, колона, та циліндра – виготовлені із якісної сталі. Бак із маслом є герметичним, для унеможливлення витікання масла. Для захисту від випадкових уламків, що можуть вилітати з великою швидкістю у напрямку до оператора використовується захисний сталевий кожух. Матриця та пуансон виготовлені із високоякісної сталі, так як все зусилля пресу передається на них

Висновок

Детально розглянувши технологічні операції з точки зору охорони праці та безпеки в надзвичайних висновках, можна зробити висновок, що всі технологічні операції задовільняють нормам, встановленим законодавством. Все обладнання має певні захисні деталі чи елементи: сталевий кожух, звукова сигналізація, автоматичне вимкнення та інше. Робочі місця – ергономічні, є можливість відпочинку та є спеціальні виділення місця для нагляду за обладнанням. Частина процесів повністю автоматизована. Устаткування виконане з якісних матеріалів. Самі технологічні процеси максимально усувають контакт із небезпечними речовинами. Є наявність герметизація на відповідних ділянках.

5 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Метою енергетичного розділу проекту є розрахунок кількості електроенергії, необхідної для забезпечення нормальної роботи цеху, а також витрат палива, газів та інших джерел енергії.

Обсяг витрат електроенергії на технологічне обладнання визначають на підставі вибору і розрахунку кількості обладнання та його потужності в режимі роботи:

$$E = M\Phi_0\eta_{зв}K_1K_2, \quad (5.1)$$

де M – встановлена потужність обладнання, кВт;

Φ_0 – річний фонд часу роботи обладнання, год;

$\eta_{зв}$ – коефіцієнт завантаження обладнання;

K_1 – коефіцієнт одночасності роботи (беруть рівним: для електричних печей - 0,6, для двигунів - 0,3, для генераторів високочастотного нагріву - 0,8);

K_2 – коефіцієнт використання потужності - 0,7.

Витрати енергії підйомно-транспортного обладнання визначають, виходячи з його потужності.

В умовах малотоннажних виробництв транспортувальне обладнання вибирають разом з основним, його характеристики вносять у відомість основного обладнання.

Витрати енергії для санітарно-технічних пристроїв (вентиляції, опалення) визначають згідно з вимогами до охорони праці та техніки безпеки.

Планетарний млин для змішування:

$$E = 2,8 \cdot 240 \cdot 8 \cdot 0,75 \cdot 0,3 \cdot 0,7 = 846,72 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Стаціонарне вібрисито:

$$E = 1,6 \cdot 240 \cdot 8 \cdot 0,6518 \cdot 0,3 \cdot 0,7 = 420,49 \text{ кВт*год.}$$

Установка електронно-променевої плавки ЕЛА-6:

$$E = 50 \cdot 240 \cdot 6 \cdot 0,605 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 24393,6 \text{ кВт*год.}$$

Результати розрахунків витрат електроенергії зводимо у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1- Річні витрати електроенергії

| Найменування струмоприймача | Кількість споживачів | Потужність, кВт | Коефіцієнт одночасності роботи | Фонд робочого часу на рік, год. | Коефі-цієнт завантаження | Річні витрати електро-енергії, кВт*год |
|--|----------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| Планетарний млин для змішування | 4 | 2,8 | 0,3 | 540,00 | 0,75 | 3386,88 |
| Стаціонарне вібрисито | 1 | 1,6 | 0,3 | 1251,46 | 0,651 8 | 420,49 |
| Установка електронно- променевої плавки ЕЛА-6 | 1 | 50 | 0,8 | 2453,76 | 0,605 | 24393,6 |
| Всього | | | | | | 28200,97 |

Розрахунок витрат енергії на освітлення для кожного приміщення виконують на підставі плану цеху. Вихідні дані для розрахунку - площа приміщення, потрібна освітленість і режим роботи освітлювальних точок.

Витрати енергії на освітлення розраховують за формулою:

$$Q = Sq \cdot \eta / 1000, \quad (5.2)$$

де S – освітлювана площа, м^2 ;

q – поверхнева щільність теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

τ – кількість годин горіння на рік;

f – коефіцієнт одночасного горіння.

Значення q зазвичай беруть: для виробничих приміщень – 11 - 15 $\text{Вт}/\text{м}^2$, для побутових і службових приміщень - 10 $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Залежно від тривалості освітлювального періоду значення τ беруть рівним: для двозмінної роботи - 2500 год, для тризмінної - 4700 год.

Коефіцієнт, який враховує одночасність горіння ламп, беруть: для виробничих прогонів - 0,8, для побутових та службових приміщень - 0,7, для підвалів - 0,9.

Розрахунок витрат електроенергії на освітлення.

Склад матеріалів (шихта):

$$Q = 45 \cdot 15 \cdot 2500 \cdot 0,8 / 1000 = 1350 \text{ кВт*год.}$$

Дільниця для замішування:

$$Q = 85,5 \cdot 15 \cdot 2500 \cdot 0,8 / 1000 = 2565 \text{ кВт*год.}$$

Дільниця для наплавлення:

$$Q = 130 \cdot 15 \cdot 4700 \cdot 0,8 / 1000 = 7332 \text{ кВт*год.}$$

Побутові приміщення:

$$Q = 91,66 \cdot 10 \cdot 4700 \cdot 0,7 / 1000 = 3015,614 \text{ кВт*год.}$$

Канторські приміщення:

$$Q = 34,51 \cdot 10 \cdot 2500 \cdot 0,7 / 1000 = 603,925 \text{ кВт*год.}$$

Склад готової продукції:

$$Q = 30,76 \cdot 15 \cdot 2500 \cdot 0,7 / 1000 = 807,45 \text{ кВт*год.}$$

Результати розрахунків витрат електроенергії зводимо у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Річні витрати електроенергії на освітлення

| Найменування споживача | Освітлювана площа, м ² | Поверхнева щільність теплогового потоку, Вт/м ² | Кількість годин горіння на рік | Річні витрати електроенергії, кВт*год |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| Склад матеріалів | 45 | 15 | 2500 | 1350 |
| Дільниця приготування шихти | 85,5 | 15 | 2500 | 2565 |
| Дільниця для наплавлення | 130 | 15 | 4700 | 7332 |
| Побутові приміщення | 91,66 | 10 | 4700 | 3015,614 |
| Канторські приміщення | 34,51 | 10 | 2500 | 603,925 |
| Склад готової продукції | 30,76 | 15 | 2500 | 807,45 |
| Всього | | | | 15673,99 |

6 ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

6.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників та їх заробітної плати

Чисельний склад та кваліфікацію робітників виробничої дільниці обчислюємо з урахуванням кількості устаткування та змінності роботи.

Після цього, визначимо заробітну плату робітникам. Витрати на оплату праці є одним із основних елементів собівартості продукції. Вони складаються з: основної заробітної плати; додаткової заробітної плати; інших заохочувальних та компенсаційних виплат.

Основна зарплата - це винагорода за виконану роботу відповідно до встановлених норм праці (норми часу, виробітку, обслуговування, посадові обов'язки).

Додаткова зарплата - винагорода за працю понад установлені норми, за трудові успіхи та винахідливість, за особливі умови праці. Вона включає доплати, надбавки, премії, пов'язані з виконанням виробничих завдань і функцій, та ін.

До інших заохочувальних та компенсаційних виплат належать виплати за підсумками роботи за рік, премії за спеціальними системами і положеннями, компенсаційні грошові і матеріальні виплати, які не передбачені актами чинного законодавства та ін.

Основним організаційно-правовим інструментом обґрунтування диференціації заробітної плати працівників різних суб'єктів господарювання (діяльності) є тарифно-посадова система, основні елементи якої такі: тарифно-кваліфікаційні довідники; кваліфікаційні довідники посад керівників, спеціалістів і службовців; тарифні сітки й ставки; схеми посадових окладів або єдина тарифна сітка

Тарифно-кваліфікаційні довідники у вигляді Єдиного тарифного кваліфікаційного довідника робіт і професій робітників (ЄТКД) - це збірник нормативних актів, що містить кваліфікаційні характеристики робіт і професій, згруповані за виробництвами та видами робіт. ЄТКД призначено для тарифікації робіт, надання кваліфікаційних розрядів робітникам, а також для формування навчальних програм підготовки їх підвищення кваліфікації робітників.

Плановий час роботи одного працівника за рік розраховуємо шляхом складання балансу робочого часу. Цей розрахунок представлений у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Плановий баланс робочого часу на рік

| Найменування витрат часу | Кількість днів |
|---|----------------|
| Кількість номенклатурних днів на рік | 365 |
| Неробочі дні, у тому числі | 125 |
| Загальнодержавні та релігійні свята | 9 |
| Вихідні | 104 |
| Час на планово-попереджувальний ремонт | 12 |
| Робочий час підприємства | 240 |
| Витрати робочого часу працівників, у тому числі | 26 |
| Хвороба | 4 |
| Чергові та додаткові відпустки | 20 |
| Невиходи з дозволу адміністрації | 3 |
| Скорочення робочого часу матерям | 1 |
| Плановий фонд робочого часу робітників за рік | 214 |

На підставі балансу робочого часу визначаємо обліковий склад робітників, який визначається з а допомогою коефіцієнта облікового складу $K_{обл}$:

$$K_{обл} = \Phi_{реж} / \Phi_{пл}, \quad (6.1)$$

де $\Phi_{реж}$ – робочий річний фонд часу роботи підприємства, днів;

$\Phi_{пл}$ – плановий фонд робочого часу працівника за рік, днів.

$$K_{обл} = 240/214 = 1,12.$$

Загальна чисельність працівників дільниці приведена в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Чисельність основних та допоміжних робітників дільниці

| Професія, спеціальність, посада | Кваліфікаційни й розряд | Явочна чисельність по змінах | | | Загалом на добу | Коефі-цієнт переводу | Облікова чисельність |
|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----|-----|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 1-а | 2-а | 3-я | | | |
| Основні робітники | | | | | | | |
| Оператор технічних ваг | 4 | 1 | | | 1 | 1,12 | 2 |
| Оператор млина | 5 | 1 | | | 1 | 1,12 | 1 |
| Оператор просіювання | 4 | 2 | | | | 1,12 | 2 |
| Оператор ЕЛА-6 | 5 | 2 | | | 2 | 1,12 | 2 |
| Всього основних робітників | | | | | 4 | | 7 |
| Допоміжні робітники | | | | | | | |
| Слюсар-ремонтник | 4 | 1 | | | 1 | 1,12 | 1 |
| Електромонтер | 4 | 1 | | | 1 | 1,12 | 2 |
| Прибиральник | 2 | 1 | | | 1 | 1,12 | 1 |
| Усього допоміжних робітників | | | | | 3 | | 4 |
| Усього робітників дільниці | | | | | 7 | | 11 |

6.2 Визначення фондів заробітної плати

Основним організаційно правовим інструментом обґрунтування диференціації заробітної плати працівників підприємств різних форм господарчої діяльності є тарифно – посадова система, елементи якої: тарифно-кваліфікаційні довідники; кваліфікаційні довідники посад керівників, спеціалістів і службовців. Типова тарифна сітка робітників різногалузевих підприємств та організацій України наведена в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Типова тарифна сітка робітників різногалузевих підприємств

| Показники | Тарифні розряди | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Тарифні коефіцієнти | 1,0 | 1,088 | 1,204 | 1,350 | 1,531 | 1,800 | 1,892 | 2,0 |
| Зростання тарифних коефіцієнтів: | | | | | | | | |
| Абсолютне | | 0,088 | 0,116 | 0,146 | 0,181 | 0,269 | 0,092 | 0,108 |
| Відносне | | 8,8 | 10,7 | 12,1 | 13,4 | 17,6 | 5,1 | 5,7 |

Важливим елементом тарифної системи є тарифна ставка. Її абсолютну величину визначають згідно зі встановленим державою мінімальним розміром заробітної плати. Так, якщо на підприємстві тарифну ставку для першого розряду встановлено на рівні 9,2 грн., то ставка другого розряду становитиме 10,0096 грн., третього 11,0768 грн. і так далі.

Розрахунок фондів зарплати управлінського персоналу наведено в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок фонду заробітної платні управлінського персоналу

| Професія, спеціальність | Чисельність осіб | Місячний посадовий оклад, грн. | Річний фонд зпрати, грн. |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Начальник дільниці | 1 | 5000 | 60000 |
| Майстер | 1 | 4500 | 54000 |
| Усього по дільниці | | | 114000 |

Розрахунок фондів зарплати основних та допоміжних робітників наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Розрахунок фондів зарплати основних та допоміжних робітників

| Професія, спеціальність | Кваліфікаційний | Годинна тарифна ставка | Облік складу, осіб | Плановий робочий фонд за рік одного працівника год | Плановий робочий фонд за рік одного працівника год | Основна заробітна плата, грн | Розрахунок додаткової плати, грн | | | | | Разом зарплата, грн |
|-------------------------|-----------------|------------------------|--------------------|--|--|------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------|-----------|------------------------------------|---------------------|
| | | | | | | | Премія, 40% | Особливі умови, 12% | Відпустка, 12% | Інші, 10% | Разом додаткова зарплата, тис. грн | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Оператор ваг | 4 | 19,68 | 2 | 1712 | 3424 | 67384,32 | 26953,73 | 8086,12 | 8086,12 | 6738,43 | 49864,40 | 117248,72 |
| Оператор млина | 5 | 22,38 | 1 | 1712 | 1712 | 38314,56 | 15325,82 | 4597,75 | 4597,75 | 3831,46 | 28352,77 | 66667,33 |
| Оператор просіювання | 4 | 19,68 | 2 | 1712 | 3424 | 67384,32 | 26953,73 | 8086,12 | 8086,12 | 6738,43 | 49864,40 | 117248,72 |
| Оператор ЕЛА-6 | 5 | 22,38 | 2 | 1712 | 3424 | 76629,12 | 30651,65 | 9195,49 | 9195,49 | 7662,91 | 56705,55 | 133334,67 |
| Допоміжні робітники | | | | | | | | | | | | |
| Слюсар-ремонтник | 4 | 19,68 | 1 | 1712 | 1712 | 33692,16 | 13476,86 | 4043,06 | 4043,06 | 3369,22 | 24932,20 | 58624,36 |
| Електромонтер | 4 | 19,68 | 2 | 1712 | 3424 | 67384,32 | 26953,73 | 8086,12 | 8086,12 | 6738,43 | 49864,40 | 117248,72 |
| Прибиральник | 2 | 15,86 | 1 | 1712 | 1712 | 27152,32 | 10860,93 | 3258,28 | 3258,28 | 2715,23 | 20092,72 | 47245,04 |
| Разом | 11 | | | 377905,12 | | | 279676,44 | | | | | 657617,56 |

7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

7.1 Науково-технічна актуальність ДР

Композити на основі сплавів систем Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo є перспективними матеріалами в газотурбінобудуванні для виготовлення високотемпературних структурних компонентів [35], [36].

Ці сплави мають високу температуру плавлення, низька у порівнянні з нікелевими сплавами густину і високі механічні властивості [9], [5], [11], [6], [10].

Вони дозволяють працювати за вищих температур, ніж добре відомі і широко вживані нікелеві суперсплави проте мати задовільні характеристики щодо опору руйнування та корозії.

Системи Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo не повністю досліджені, а тому є сенс пошуку нових фаз з більш високими міцнісними, технологічними, експлуатаційними властивостями.

Для пошуку нових кращих механічних, експлуатаційних та інших властивостей потрібно створювати знажки з різним вмістом компонентів

Враховуючи різні галузі (а особливо газотурбінобудування) та їх потреби було створено сплави системи Nb-Si-B, ат. %: Nb-6Si-25Cr, Nb-6Si-30Cr, Nb-6Si-35Cr, Nb-20Si-2Mo, Nb-20Si-4Mo, Nb-20Si-6Mo, Nb-20Si-22Ti, Nb-20Si-24Ti.

7.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Розрахунок усіх витрат на НДР, пов'язаних з виконанням даної теми, дає можливість встановити планову кошторисну вартість даної теми. Планування НДР забезпечує зниження трудових і матеріальних витрат з метою отримання найкращих результатів за найменших витрат [37].

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат:

- заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- відрахування на соціальне страхування;

- вартість спец обладнання для виконання НДР;
- вартість матеріалів, необхідних для проведення НДР;
- витрати на відрядження.
- інші прямі витрати по темі.
- накладні витрати.

7.2.1 Витрати на оплату праці

Витрати за цією статтею включають заробітну плату працівників усіх категорій, зайнятих виконанням робіт з даної теми.

Заробітна плата розраховується на основі даних про трудомісткість окремих робіт і посадових окладів виконавців цих робіт. Розрахунок ведеться в людино-днях.

Перелік робіт та їх трудомісткість зведено в таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 – Трудомісткість робіт

| Етапи НДР | Трудомісткість, людино-днів | | | |
|---------------------------------------|--|--------------------------------------|-----------------------|----------|
| | Відп. викон. теми, ст. науковий співробіт. | Молодший науковий співробітник | Інженер- дослідник | Лаборант |
| Підготовчий етап | 6 | 3 | 6 | -- |
| Проведення експерименту | 15 | 7 | 23 | 34 |
| Написання записки | 7 | -- | 21 | -- |
| Оформлення, перевірка та захист | 5 | -- | 10 | -- |
| Разом | 33 | 10 | 60 | 34 |

Денні зарплати визначаються як відношення місячного окладу до умовного місяця (для ДР з п'ятиденним робочим тижнем складає 21,2 дня).

Перемножуючи середньоденну заробітну плату за кожною категорією виконавців на відповідну планову трудомісткість робіт, розраховується плановий фонд заробітної плати всіх виконавців. Результати розрахунку фонду заробітної плати з теми зведено у таблиці 7.2.

7.2.2 Єдиний соціальний внесок

Сума єдиного соціального (B_C) визначаються у відсотках у відсотках від загального фонду заробітної плати виконавців з теми. Норматив відрахувань необхідно брати в розмірі 22% загального фонду заробітної плати. Таким чином, єдиний соціальний внесок складе:

$$B_C = 52860 * 0,22 = 11\,629,2 \text{ грн.}$$

Таблиця 7.2 – Фонд заробітної плати

| Посада | Трудомісткість, людино-днів | Місячний оклад, грн. | Денна заробітна плата, грн. | Сумарна заробітна плата за виконавцями, грн. |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| Старший науковий співробітник | 33 | 15052 | 710 | 23430 |
| Інженер- дослідник | 50 | 5406 | 255 | 12750 |
| Технік | 10 | 12296 | 580 | 5800 |
| Лаборант | 34 | 6784 | 320 | 10880 |
| Разом | 52860 | | | |

7.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Витрати на матеріали, які необхідні для проведення даної НДР вираховуються з ціни одиниці продукції і загальної кількості використаного матеріалу. Результати розрахунків зведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР

| Найменування матеріалів | Одиниця виміру | Кількість | Ціна за кг, грн. | Сума, грн. |
|-------------------------|----------------|-----------|------------------|------------|
| Порошок Nb | кг | 0,025 | 5400 | 70,2 |
| Порошок Si | кг | 0,003 | 4100 | 8,2 |
| Порошок В | кг | 0,001 | 8100 | 8,1 |
| Порошок Cr | кг | 0,001 | 7000 | 7 |
| Порошок Ti | кг | 0,0005 | 1500 | 0,75 |
| Порошок Mo | кг | 0,0002 | 2500 | 0,5 |
| Невраховані витрати | -- | -- | -- | 40 |
| Разом | 134,75 | | | |

Транспортно-заготівельні витрати складають 10% від планової вартості використаних матеріалів, тоді загальні витрати по цій статті становлять:

$$В_{м(заг)} = 134,75 * 1,1 = 148,23 \text{ грн.}$$

7.2.4 Витрати на спеціальне обладнання та прилади

В роботі використовуються вже існуюче обладнання: лабораторні терези, електроіскровий станок, оптичний мікроскоп «NEOPHOT21», мікротвердомір MHV-1000.

Спеціальне устаткування для виконання НДР не закуповувалось.

7.2.5 Витрати на службові відрядження

Всі роботи проводились безпосередньо в лабораторіях Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського», тому витрати на виробничо-наукові відрядження не передбачені.

7.2.6 Інші прямі не враховані витрати

Ця стаття поєднує в собі всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей (оплата спеціалістів з інших організацій, оплата консультацій, використання обладнання інших організацій та інше).

Під час проведення даної роботи інші прямі витрати складають 10% від суми врахованих витрат на НДР.

$$I_B = (52860 + 11629,2 + 148,23) * 0,1 = 6463,74 \text{ грн.}$$

7.2.7 Накладні витрати

До накладних витрат (H_B) відносять:

- заробітна плата адміністративна – управлінського, господарського та обслуговуючого персоналу з єдиним соціальним внеском;
- витрати на придбання експериментального спеціального обладнання та приладів;
- витрати по охороні праці та на техніку безпеки;
- утримання виробничих площ, приладів, устаткування та установок;
- витрати на воєнізовану охорону;
- інші загальногосподарські та дослідницькі витрати.

За нормативами для НТУУ «КПІ» величина накладних витрат складає 20% від суми всіх прямих витрат по темі.

$$H_B = (52860 + 11629,2 + 148,23 + 6463,74) * 0,20 = 14220,23 \text{ грн.}$$

7.2.8 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Зроблені розрахунки дозволяють визначити загальну планову кошторисну вартість виконання НДР. Плановий кошторис витрат по темі досліджень наведено в таблиці 7.4.

7.3 Науково-технічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту ДР необхідний для визначення доцільності проведення даної роботи. Однак, економічний ефект може бути розрахований тільки по ДР, які безпосередньо націлені на створення нових матеріалів, покращення параметрів та якості продукції, а також створення нових конструкцій тощо.

Таблиця 7.4 – Планова кошторисна вартість НДР по темі

| Назва статей | Умовне позначення | Сума, грн. | Сума, % | Обґрунтування |
|--|-------------------|------------|---------|-----------------------------|
| Заробітна плата виконавців теми | ЗП | 52860 | 61,95 | За розрахунками |
| Єдиний соціальний внесок | В _С | 11629,2 | 13,63 | 22% від ЗП |
| Вартість основних матеріалів | В _М | 148,23 | 0,17 | За розрахунками |
| Вартість спец. обладнання | В _{ОБ} | - | - | Не планується |
| Витрати на послуги сторонніх організацій | В _{СО} | - | - | Не планується |
| Інші прямі витрати | І _В | 6463,74 | 7,58 | 10% від усіх |
| Накладні витрати | Н _В | 14220,23 | 16,67 | 20% від усіх витрат |
| Разом | В _{ДР} | 85321,4 | 100 | Сума всіх попередніх статей |

За основний показник ефективності фундаментальних досліджень беруть науково-технічний ефект. Науково-технічний ефект $E_{нт}$ пошукових та прикладних досліджень кількісно визначають узагальненим показником, який враховує рівень часткових показників: новизну, перспективність та ступінь реалізованості наслідків дипломної роботи.

Узагальнений показник можна визначити за допомогою оцінок, виражених у балах:

$$E_{HM} = \sum_{i=1}^3 R_i * Q_i \quad (5.1)$$

де R_j – коефіцієнт вагомості новизни (0,4), перспективності (0,2) та реалізованості наслідків НДР (0,4);

Q – новизна, перспективність та реалізованість, балів (табл. 7.5).

Таблиця 7.5 – Оцінка науково-технічного ефекту НДР

| Показник НДР | Характеристика результатів | Бали |
|-----------------|---|------|
| Новизна | Техніко-економічні показники нової технології на галузевому рівні | 8 |
| Перспективність | Технологія може бути впроваджена у порошковій металургії | 8 |
| Реалізованість | Термін впровадження нової технології – до 1-го року | 6 |

Узагальнений показник:

$$E_{нт} = 8 * 0,4 + 8 * 0,2 + 6 * 0,4 = 7,2 \text{ балів.}$$

Розрахований показник свідчить про доцільність виконання НДР по даній темі.

8 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Як відомо, на сьогоднішній день все більше набувають популярності «стартап-проекти». Тому в даній роботі розглядається можливість розроблення проекту за темою дисертації.

Інновація — це новостворені (застосовані) і (або) вдосконалені конкурентоздатні технології, продукція або послуги, а також організаційно-технічні рішення виробничого, адміністративного, комерційного або іншого характеру, що істотно поліпшують структуру та якість виробництва і (або) соціальної сфери [39].

Інновації — це реальні процеси створення нових знань, систем та засобів виробництва, технологій і впровадження їх у сферу економіки чи державного управління, товарообміну або міжнаціональних зв'язків. Якщо поширення інновації набуває загальносуспільного характеру, то інновація стає національним комплексно-інноваційним процесом. Інновація стає процесом тоді, коли вона базується на безперервному розвитку науково-технічного прогресу та його втіленні в нові види засобів виробництва, технологій, продуктів, форм і методів виробництва й управління [37]. Інновація як процес завершується лише тоді, коли споживач оцінить стосовно своїх потреб ідею і знання щодо їх реалізації, технічний засіб виробництва та реальне використання його під час виробництва продукту, реалізацію товару й отримання прибутку, купівлю товару і задоволення виробничих та соціальних потреб.

Тому, для початку слід розглянути питання, що таке стартап-проект — нещодавно створена компанія (можливо, ще не зареєстрована офіційно, але планує стати офіційно), що будує свій бізнес на основі інноваційних технологій, не вийшла на ринок чи почала виходити і що володіє обмеженими ресурсом. Таким чином компанія є обмеженою ресурсно, тому вона сильно залежить від інвесторів. Тому в першому випадку доцільно розглянути саму ідею стартап-проекту яка представлена в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

| Зміст ідеї | Напрямки застосування | Вигоди для користувача |
|--|----------------------------------|---|
| Отримання композиційних порошків на основі Nb для високотемпературних застосувань. | Авіабудування та літакобудування | Виготовлення лопаток для газотурбінних двигунів та інших деталей які потребують високої жаростійкості |

Однак, на сьогоднішній день ринок України займає не тільки вітчизняні, а і міжнародні фірми, які продовжують тримати лідерство, тому доцільним є розглянути позитивні та негативні сторони даного проекту та конкурентів (таблиця 8.2).

Таблиця 8.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № | Техніко-економічні характеристики ідеї | Товар | | | | W (слабка сторона) | N (нейтральна сторона) | S (сильна сторона) |
|---|--|---|--------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | | Мій проект | НВО «Сатурн» | ПАТ «Мотор Січ» | ДП «Зоря - Машпроект» | | | |
| 1 | Надійність | Композиційні порошки складу Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo | | | | | | + |
| 2 | Міцність | | | | | | | + |
| 3 | Ціна | | | | | | + | |

Основним чинником виконання даного проекту, чи роботи, є можливість застосування надійної та простої технології виготовлення. Дана технологія

повинна мати гарну відтворюваність результатів, та мати економічний ефект під час використання, аналіз технології наведений в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

| № | Ідея проекту | Технології реалізації | Наявність технології | Доступність технологій |
|--|--|---------------------------------|---|------------------------|
| 1 | Композиційні порошки скаладу Nb-Si-B, Nb-Si-Cr, Nb-Si-Ti, Nb-Si-Mo | Точне лиття | Наявна технологія, проте має складну багатоетапту технологію процесу, підвищене виділення шкідливих хімічних речовин в ході термічного видалення модельованої речовини | Наявна технологія |
| | | Електронно-променеве оплавлення | Наявна технологія, перевагою є можливість, незалежно від процесу плавки, плавно та в широких межах змінювати потужність тепла, що закладається, а також конфігурацію зони нагріву | Наявна технологія |
| Обрана технологія реалізації ідеї проекту: електронно променеве оплавлення | | | | |

Як було показано вище, найбільш оптимальним методом отримання матеріалу є електронно променеве оплавлення, яка дає найбільш ефект, так як дозволяє незалежно від процесу плавки, плавно та в широких межах змінювати потужність тепла, що закладається, а також конфігурацію зони нагріву.

Технологічність – відповідність продукції вимогам економічної технології її використання. Технологічність забезпечується під час розробки конструкції

виробу. Технологічною називається така конструкція виробу або його складових елементів (деталей, вузлів, механізмів), яка забезпечує задані експлуатаційні якості продукції і дозволяє за даною серійністю виготовляти її з найменшими затратами праці та матеріалів. Технологічна конструкція характеризується простотою компоновки, довершеністю форм. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту представлена в таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № | Показник стану ринку | Характеристика |
|---|---|-----------------------|
| 1 | Кількість головних гравців | 3 |
| 2 | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од | 10 000 |
| 3 | Динаміка ринку | Зростає |
| 4 | Наявність обмежень для входу | Спеціальне обладнання |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | Присутні |
| 6 | Середня рентабельність в галузі, % | Більше 25 % |

Також під час входження на ринок слід враховувати цільову аудиторію на яку буде направлений збут товарів та послуг, враховуючи потреби та вимоги споживачів, так як вони формують ринок (табл. 8.5).

Таблиця 8.5. – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| № | Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія | Відмінність у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару |
|---|---|---|--|--|
| 1 | Велике значення міцності за високої температури | Авіабудування та літакобудування, машинобудування | До даних деталей застосовують спеціальні випробування, та стандарти, які визначають самі покупки | Вимоги до продукції: -доступна вартість -висока стабільність -довговічність -відповідність вимогам Вимоги до компанії - стабільність товару та поставок -можливість корегування замовленням під час виробництва |

Однак, як з перевагами отримання прибутку можуть виникнути загрози зриву проекту, які слід детально розглянути в таблиці 8.6. Як видно із даної таблиці, найбільшу небезпеку на сьогодні становить перебіг в постачанні продукції, який в першу чергу пов'язаний через дефіцит продукції. Однак якщо вирішити дане питання, то вірогідність на успіх є великою через те, що даний ринок товарів та послуг не є переповненим.

Таблиця 8.6 – Фактори загроз

| № | Фактори | Зміст загрози | Можлива реакція компанії |
|---|-----------------------|---|--|
| 1 | Виготовлення сировини | Недостатня кількість сировини, через складність обігу | Можливість закупівлі у інших компаній, чи початок налагодження свого |
| 2 | Складність доставки | Несвоєчасна доставка товару | Розробка та налагодження логістичних зв'язків |

Також на сьогоднішній день варто враховувати і альтернативні ринки, які в тій чи іншій мірі можуть бути зацікавлені в нашій продукції через її високу

надійність в порівнянні із аналогами (табл. 8.7). Однак слід врахувати, що даний ринок не є основним і на нього не потрібно робити великі ставки, так як це за часту одиничні замовлення.

Таблиця 8.7 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| № | Альтернативні ринки збуту | Ймовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|---|---|-----------------------------------|---|
| 1 | Медицина (стоматологія) | Одиничні замовлення | В залежності від складності та кількості необхідного товару |
| 2 | Авіабудування та авіакосмічна промисловість | | |
| 3 | Ядерна промисловість | | |

Надалі логічним є ступеневий аналіз конкуренції на ринку, так як даний аспект дасть можливість точно сказати в який період часу варто впроваджувати продукцію і з якої кількості товару чи послуги доцільно розпочинати (табл. 8.8). Аналізуючи таблицю можна побачити, що тисячами на рік, тобто немає масового виробництва, що дає можливість для нових фірм та дослідно-промислового виробництва.

Аналіз конкурентів – це щорічні зведення (довідники) техніко-економічних показників підприємств тих галузей (підгалузей), до яких входять конкуренти; статистичні довідники, підготовлені органами статистики; газети, журнали (галузеві).

Таблиця 8.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища | В чому проявляється дана характеристика | Вплив на діяльність підприємства |
|---|--|---|
| 1. Вказати тип конкуренції – олігополія | На сьогоднішній день ПАТ «Мотор Січ» та ДП «Зоря - Машпроект» є основними постачальниками товару в Україні | Зменшення ціни на товар, та покращення якості |
| 2. За рівнем конкурентної боротьби – національна | На міжнародному рівні зарекомендована компанія ПАТ «Мотор Січ» | Завоювати довіру на Українському ринку, та розвинути на міжнародний |
| 3. За галузевою ознакою – міжгалузева | Найбільш привабливими є літакобудування та авіабудування | Реалізовувати товар в своїх галузях |
| 4. За характером конкурентних переваг – не цінова | На даний вид промисловості витрачаються великі кошти | Слід за меншу ціну збільшити показники ефективності деталей |
| 5. За інтенсивністю | Низька інтенсивність, яка проявляється за кількістю проданої продукції | Можливості для невеликої партії |

Аналізуючи всі наведені фактори доцільно скласти SWOT аналіз, який представлений в таблиці 8.9. SWOT - аналіз для визначення факторів і явищ, що роблять найбільший вплив на підприємство. Цей етап включає також визначення стадії життєвого циклу продукції, що дозволяє оцінити необхідність вкладень в розробку вдосконалених видів продукції з тим, щоб уникнути погіршення ринкової позиції в майбутньому.

– Strengths (сильні сторони – досвід та вміння, що дають змогу організації задумати та забезпечити виконання її стратегії.);

– Weaknesses (слабкі сторони – досвід і вміння, що не сприяють вибору та втіленню стратегії, потрібної для виконання місії організації. Організація має два шляхи вирішення проблеми «слабких сторін». По-перше, вона може робити інвестиції, щоб отримати перевагу, необхідну для виконання місії. По-друге,

можна змінити місію так, щоб її досягти за допомогою досвіду й умінь, які організація вже має);

– Opportunities (можливості – це умови середовища, що забезпечують досягнення високого результату);

– Threats (загрози – це умови середовища, що ускладнюють досягнення високих результатів навиків і вмінь).

Таблиця 8.9 – SWOT- аналіз стартап-проекту

| Сильні сторони | Слабкі сторони |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – розуміння підбору матеріалів для використання в заданих умовах з мінімальною ціною виробу – відпрацювання технології отримання композиційного порошку – можливість корегування розміру отриманих порошків – підкріплення практичних даних теоретичними розрахунками для моделювання процесів, які відбуваються під час експлуатації деталі. Та подальша оптимізація процесу | <ul style="list-style-type: none"> – недостатня кількість спеціалістів в даній галузі (покупців) може призвести до непорозуміння під час постановки задачі – висока вартість проведення деяких видів аналізу матеріалів. |
| Можливості | Загрози |
| <ul style="list-style-type: none"> – набутий досвід, призведе до правильного напрямку втілення та досягнення високих результатів – створення та апробація результатів експерименту, з фундаментальними дослідженнями – можливість виходу на інші ринки збути за невеликої кількості замовлень – залучення та навчання молодих кадрів та використання сучасного обладнання | <ul style="list-style-type: none"> – можливість несвоєчасного постачання сировини – великі витрати на розхідні матеріали та на енергію – нестабільність курсу – висока вартість обладнання |

Для визначення існуючої позиції бізнесу та його частин, а також розробки можливих напрямків розвитку можуть використовуватися моделі портфельного аналізу.

Для завершення, слід вказати які основні переваги нашого потенційного товару в порівнянні із аналогами, що дасть можливість стверджувати, про можливість конкурентно спроможності (табл. 8.10).

Таблиця 8.10 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № | Потреба | Вигода, яку пропонує товар | Ключові переваги перед конкурентами |
|---|------------|---------------------------------|---|
| 1 | Міцність | Отримання композиційних | Міцність виробів виготовлених із цих порошків привисоких температурах |
| 2 | Надійність | порошків на основі Nb для | Надійна робота за циклічних навантажень |
| 3 | Дешевизна | високотемпературних застосувань | Дешевизна товару на 25% від конкурентів |

Таким чином, можна побачити, що композиційні порошки на основі Nb для високотемпературних застосувань на сьогоднішній день є перспективними для виготовлення різних деталей у галузях літакобудування та машинобудування. Дана технологія та виробництво може бути реалізована приблизно за рік з відповідною сировинною базою.

ВИСНОВКИ

На основі отриманих даних було сформульовано наступні висновки:

1. Методом електронно-променевого оплавлення були отримані евтектичні сплави, ат. %: 62Nb-25Si-13B, Nb-6Si-25Cr, Nb-6Si-30Cr, Nb-6Si-35Cr, Nb-20Si-2Mo, Nb-20Si-4Mo, Nb-20Si-6Mo, Nb-20Si-22Ti, Nb-20Si-24Ti.
2. Встановлено, що найвищу середню мікротвердість серед зразків має сплав Nb-25Si-13B – 19,404 ГПа, але має найнижчу тріщиностійкість – $1,74 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1/2}$.
3. Встановлено, що найвищою тріщиностійкістю $3,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1/2}$ та $4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1/2}$ серед зразків володіють сплави Nb-6 ат. % Si-25 ат. % Cr та Nb-6 ат. % Si-30 ат. % Cr відповідно та мають середню мікротвердість серед зразків - 7,59 ГПа та 7,6 ГПа, відповідно. Фаза ніобію є перепорою для розповсюдженню тріщин.
4. У сплавах Nb-6 ат. % Si-35 ат. % Cr, Nb-20 ат. % Si-2 ат. % Mo, Nb-20 ат. % Si-6 ат. % Mo та Nb-20 ат. % Si-22 ат. % Ti тріщин не спостерігається навіть за навантаження в 10 Н, мікротвердість - 8,66 ГПа; 4,72 ГПа; 6,2 ГПа; 3,56 ГПа відповідно.
5. Встановлено, що твердість і тріщиностійкість у порівнянні з іншими методами на 20-30% вища, за рахунок швидкісного охолодження сплавів в умовах отримання електронно-променевим оплавленням
6. В роботі розрахована планова кошторисна собівартість проведення даної дипломної роботи з урахуванням всіх видів визначених ресурсів.
7. Обґрунтована науково – технічна актуальність та економічна доцільність проведеної роботи.

CONCLUSIONS

Based on the obtained data, the following conclusions were formulated:

1. The method of electron beam melting was obtained alloys at. %: 62Nb-25Si-13B, Nb-6Si-25Cr, Nb-6Si-30Cr, Nb-6Si-35Cr, Nb-20Si-2Mo, Nb-20Si-4Mo, Nb-20Si-6Mo, Nb-20Si-22Ti, Nb-20Si-24Ti.

2. Found that the average microhardness of the samples is calculated. The highest average microhardness among the samples has the alloy Nb-25Si-13B - 19,404 GPa, but has the lowest crack resistance - $1.74 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$. The niobium phase is a barrier to the propagation of cracks.

3. Found that alloys have the highest fracture toughness $3,6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ and $4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ among the specimens Nb-6 at. % Si-25 at. % Cr and Nb-6 at. % Si-30 at. % Cr respectively and have an average microhardness among the samples - 7.59 GPa and 7.59 GPa, respectively.

4. In alloys Nb-6 at. % Si-35 at. % Cr, Nb-20 at. % Si-2 at. % Mo, Nb-20 at. % Si-6 at. % Mo and Nb-20 at. % Si-22 at. % Ti cracks even when loaded at 10 N is not detected, microhardness - 8,66 GPa; 4.72 GPa; 6.2 GPa; 3.56 GPa, respectively.

5. Found that hardness and crack resistance in comparison with other methods is 20-30% higher due to the rapid cooling of the alloys in the conditions of receiving electron beam melting

6. The planned estimated cost of conducting this diploma work, taking into account all types of defined resources.

7. The scientific and technical relevance and economic feasibility of the work carried out are substantiated.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Wey J. Experimental studies and modeling for the transition from internal to external oxidation of three-phase Nb-Si-Cr alloys [Text] / J. Wey, S. Wei, S. Jiangbo // Progress in Natural Science: Materials International. – 2018. – Vol. 28, № 1. – P. 740-748.
2. Zhang S. Microstructural evolution and mechanical properties of Nb-Si-Cr ternary alloys with a tri-phase Nb/Nb₅Si₃/Cr₂Nb microstructure fabricated by spark plasma sintering [Text] / S. Zhang, W. Liu, J. Sha // Progress in Natural Science: Materials International. – 2018. – Vol. 28, № 1. – P. 626-634.
3. Xiao M. Direct atomic-scale visualization of growth and dissolution of γ Nb₅Si₃ in an Nb-Ti-Si based alloy via in-situ transmission electron microscopy [Text] / M. Xiao, W. Liu, J. Sha // Scripta Materialia. – 2019. – Vol. 164, № 1. – P. 86-90.
4. Дурягіна З. А. Сплави з особливими властивостями [Текст] / З. А. Дурягіна, О. Я. Лизун, В. Л. Пілюшенко. – Л. : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2007. – 236 с.
5. Белов А. Ф. Строение и свойства авиационных материалов [Текст] / А. Ф. Белов. – М. : Металлургия, 1989. – 368 с.
6. Жаворонкова Н. М. Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники [Текст] / Н. М. Жаворонкова. – М. : Наука, 1978. – 341 с.
7. Ульянин Е. А. Коррозионностойкие сплавы на основе железа и никеля [Текст] / Е. А. Ульянин, Т. В. Свистунова, Ф. Л. Левин. – М. : Металлургия, 1986. – 263 с.
8. Sung Y. L. Synthesis of Nb-Mo-Si based in situ composite powder by a hydrogenation-dehydrogenation reaction [Text] / Y. L. Sung, W. Lee, K. B. Park // Material. – 2019. – Vol. 248, № 1. – P. 32-35

9. Xiao M. Direct atomic-scale visualization of growth and dissolution of $\gamma\text{Nb}_5\text{Si}_3$ in an Nb-Ti-Si based alloy via in-situ transmission electron microscopy [Text] / M. Xiao, W. Liu, J. Sha // Scripta Materialia. – 2019. – Vol. 164, № 1. – P. 86-90.
10. Wachtman J. Advanced Ceramics, Materials, and Structures [Text] / J. Wachtman // Ceramic Engineering and Science Proceedings Wachtman. – 2008. – Vol. 17, № 1. – P. 131.
11. Fuxin W. Morphological evolution of primary $\text{b-Nb}_5\text{Si}_3$ phase in Nb-Mo-Si alloys [Text] / F. Wang, L. Luo, X. Meng // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 741, № 1. – P. 51-58.
12. Perepezko J. H. Phase Stability and Microstructure Design in High Temperature (Mo, Nb)–Si–B Alloys [Text] / J.H. Perepezko // Intermetallics. – 2011. – Vol. 43, № 19. – P. 26-34.
13. Zhang F. Microstructural effect on oxidation kinetics of NbSi₂ at 1023 K [Text] / F. Zhang, L. Zhang, A. Shan // Alloys Compd. – 2006. – Vol. 23, № 1. – P. 308-312.
14. Liu A. Effect of B on the microstructures and high temperature oxidation resistance of a Nb–Si system in-situ composite [Text] / A. Liu, S. Li, L. Sun // Mater. Sci. Forum. – 2007. – Vol. 13, № 1. – P. 1489-1494.
15. Sun, Z. Thermodynamic modeling of the Nb-rich corner in the Nb–Si–B system [Text] / Z. Sun, Y. Yang, X. Guo // Intermetallics. – 2011. – Vol. 19, № 1. – P. 26-34.
16. Sun Z. Thermodynamic modeling of the Nb-rich corner in the Nb-Si-B system [Text] / Z. Sun, Y. Yang, X. Guo // Intermetallics. – 2011. Vol. 16, № 19. – P. 26-34.
17. Cheng J. Oxidation behavior of Nb–Si–B alloys with the NbSi₂coating layer formed by a pack cementation technique [Text] / J. Cheng, S. Yi, J. Sik // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2013. – Vol. 41, № 1. – P. 103-109.
18. Ukegawa M. Interfacial reaction sin Nb/NbSi₂ and Nb/NbSi₂–B systems [Text] / M. Ukegawa, A. Yamauchi, A. Kobayashi // Vacuum. – 2009. – Vol. 83, № 1. – P. 157-160.

19. Junior D. Liquidus projection of the Nb–Si–B system in the Nb-rich region [Text] / D. Junior, C. Nunes, G. Coelho // *Intermetallics*. – 2003. – Vol. 11, № 1. – P. 251-255.
20. Kurokawa K. Improvement of oxidation resistance of NbSi₂ by addition of boron [Text] / K. Kurokawa, A. Yamauchi, S. Matsushita // *Mater. Sci. Forum*. – 2005. Vol. 502, № 1. – P. 243-248.
21. Murakami T. Microstructure, mechanical properties and oxidation behavior of power compacts of the Nb–Si–B system prepared by spark plasma sintering [Text] / T. Murakami, C. N. Xu, A. Kitahara // *Intermetallics*. – 1999. Vol. 7, № 1. – P. 1043-1048.
22. Behrani V. Microstructure and oxidation behavior of Nb–Mo–Si–B alloys [Text] / V. Behrani, A. Thom, M. Kramer // *Intermetallics*. – 2006. – Vol. 14, № 1. – P. 24-32.
23. Wachtman J. Advanced Ceramics, Materials, and Structures [Text] / J. Wachtman // *Ceramic Engineering and Science Proceedings* Wachtman. – 2008. – Vol. 17, № 1. – P. 131.
24. Mansurova A. Kinetic Analysis of the Oxidation of Nb–Si Eutectic Alloy Doped with Boron [Text] / A. Mansurova, R. Gulyaeva, M. Chumarev // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 318-326.
25. Candioto K. Microstructural characterization of Nb–B–Si alloys with composition in the Nb–Nb₅Si₂B (T₂-phase) vertical section [Text] / C. A. Nunes, G. C. Coelho, P. A. Suzuki // *Materials Characterization*. – 2001. – Vol. 47, № 1. – P. 241-245
26. Katrych S. Structural materials: metal–silicon–Boron. The Nb-rich corner of the Nb–Si–B system [Text] / A. Grytsiv, A. Bondar, P. Rogl, T. Velikanova, M. Bohn // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2004. – Vol. 177, № 2. – P. 493-497.
27. Mediukh N. First-principles calculations for the mechanical properties of Ti–Nb–B₂ solid solutions [Text] / P. E. A. Turchi, V. I. Ivashchenko, V. I. Shevchenko // *Computational Materials Science*. – 2017. – Vol. 129. № 1. – P. 82-88.

28. Про Загальнодержавну програму реформування і розвитку житловокомунального господарства на 2009-2014 роки [Електронний ресурс] / Закон України від 11.06.2009 р. № 1511-IV // Офіційний сайт Верховної Ради України «Законодавство України». – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua>.

29. Мазур В. И. Введение в теорию сплавов. Учебное пособие по дисциплинам «Материаловедение», «Металловедение и термическая обработка металлов» [Текст] / В. И. Мазур, А. В. Мазур. – Д. : Лира ЛТД, 2009. – 264 с.

30. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Text] : ДСН 3.3.6.042 – 99. – [Введено з 1.12.99]. – К. : 1999. – 10 с.

31. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Текст] : ГОСТ 12.1.005-88. – [Введён с 01.01.1988]. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 78 с.

32. Строительные нормы и правила. Производственные здания [Text] : СНиП 2.09.02-85. – [Введён с 27.09.1988]. – М. : ГОССТРОЙ СССР, 1991. – 17 с.

33. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Text] : НАПБ Б.03.002-2007. – [Введений з 03.12.2007 р.]. – К. : Держстандарти України, 2007. – 12 с.

34. Пожарная безопасность. Общие требования безопасности [Text] : ГОСТ 12.1.004-91. – М. : Государственный стандарт СССР, 1996. – 72 с.

35. Bewlay B. A review of very-high-temperature Nb–silicide-based composites [Text] / B. Bewlay, M. Jackson, J. Zhao // Metall. and Mater. Trans. – 2003. – Vol. 34. № 1. – P. 2043-2052.

36. Grashchenkov D. Development of powder metallurgy of refractory materials [Text] / D. Grashchenkov, B. Shchetanov, I. Efimochkin // Mater. – 2011. №. 5. – P. 113-119.

37. Типове положення з планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт [Text] // Галицькі контракти. – 1996. – №40. – С. 41-50.

38. Васильєв О. В. Конспект лекцій «Економіка і організація інноваційної діяльності» (для студентів 4 курсу напряму підготовки 0501 «Економіка і підприємництво» спеціальності 6.050100 «Економіка підприємства») [Текст] / О. В. Васильєв, Н. М. Богдан ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва – Харків : ХНАМГ, 2010. – 100 с.
39. Слюсапенко О. О. Словник підприємця [Текст] / О. О. Слюсапенко, Д. Д. Огородніков, В. Л. Наконечний. – К. : Вид-во РВПС України, НАН України, 1999. – 196 с.